

**СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**



**КЛИМАТОЛОГИЯ С ОСНОВАМИ МЕТЕОРОЛОГИИ**

Учебно-методическое пособие

**Рязань 2021**

УДК 551.  
ББК 26.237  
К 49

**Климатология с основами метеорологии: Учебное пособие/ сост.**  
Барановский А.В., Современный технический университет. - Рязань, 2021.  
78 стр. - Электронное издание.

Рецензент: директор ООО «Окские просторы» Бурмистрова Е.О.

Учебное пособие составлено по материалам отечественных учебников, научных монографий и статей, а также разработок авторов. В пособии рассматриваются вопросы климатологии с основами метеорологии.

*Печатается по решению Ученого Совета Современного технического  
университета*

УДК 551.  
ББК 26.237  
К 49

© Барановский А.В.,  
© Современный технический  
университет, 2021

## Оглавление

Лекция 1 .....	5
<i>Метеорология и климатология. Погода и климат.</i> .....	5
<i>Прогноз погоды (в том числе химической и биологической). Прогноз опасных явлений.</i> .....	5
<i>Изменение климата. Необходимость синтетического подхода.</i> .....	7
<i>Источники информации.</i> .....	10
<i>Суперкомпьютерное моделирование и прогноз климата.</i> .....	11
Лекция 2 .....	12
<i>Газовый состав воздуха. Аэрозоли.</i> .....	12
<i>Вертикальная структура атмосферы.</i> .....	12
<i>Плотность.</i> .....	13
<i>Атмосферное давление.</i> .....	14
<i>Водяной пар. Парциальное давление. Относительная влажность.</i> .....	15
Лекция 3 .....	18
<i>Распределение энергии в спектре Солнца.</i> .....	18
<i>Основы теории радиации. Спектр абсолютно черного тела. Закон Планка. Закон Стефана – Больцмана. Закон Вина.</i> .....	19
Лекция 4 .....	24
<i>Мутная среда. Атмосферная радиация: пропускание, отражение, поглощение слоев.</i>	
<i>Прямая и рассеянная (диффузная) радиация.</i> .....	24
<i>Уравнение радиации: формула Бэра-Буге-Ламберта.</i> .....	26
<i>Излучение. Излучение поверхности Земли. Излучение молекулами газа. Окно прозрачности.</i> .....	27
<i>Уравнение Шварцшильда.</i> .....	28
<i>Альбедный и парниковый эффект.</i> .....	28
Лекция 5 .....	29
<i>Светимость Солнца и солнечная активность. Солнечная постоянная.</i> .....	29
<i>Солнечная радиация (инсоляция) на ВГА. Сезонность. Зональность и сезонность как важнейшие факторы географической среды.</i> .....	31
<i>Солнечная радиация в атмосфере: суммарная радиация.</i> .....	32
Лекция 6 .....	34
<i>Уравнение радиационного баланса.</i> .....	35
<i>Радиационный бюджет на ВГА и перенос энергии.</i> .....	38
Лекция 7 .....	41

<i>Вода в атмосфере</i> .....	41
<i>Закон Дальтона</i> .....	42
<i>Характеристики влажности воздуха</i> .....	43
<i>Конденсация в атмосфере</i> .....	44
<i>Классификация облаков</i> .....	46
<i>Облачность</i> .....	47
<b>Лекция 8</b> .....	<b>48</b>
<i>Туманы</i> .....	48
<i>Атмосферные осадки</i> .....	50
<i>Электричество облаков и осадков</i> .....	51
<i>Снежный покров</i> .....	52
<i>Тепловой баланс земной поверхности</i> .....	52
<b>Лекция 9</b> .....	<b>55</b>
<i>Климатическая комфортность и климат города</i> .....	55
<i>Городской остров тепла</i> .....	55
<i>Метеорологическая комфортность</i> .....	59
<b>Лекция 10</b> .....	<b>62</b>
<i>Барическое поле и геострофический ветер</i> .....	62
<i>Географическое распределение давления</i> .....	64
<i>Общая циркуляция атмосферы</i> .....	66
<i>Циркуляционные системы разного масштаба. От общей циркуляции до мелкомасштабной турбулентности</i> .....	67
<b>Лекция 11</b> .....	<b>69</b>
<i>Атмосферная циркуляция</i> .....	69
<i>Циркуляция в тропиках</i> .....	70
<i>Тропические циклоны</i> .....	72
<i>Атмосферная циркуляция умеренных широт</i> .....	73

# Лекция 1

## Метеорология и климатология. Погода и климат.

**Метеорология** – это наука об атмосфере, которая ориентирована на прогнозирование погоды. Иногда термин «метеорология» используется как синоним понятия «физика атмосферы» («физика на открытом воздухе»), хотя на самом деле это не совсем так. Метеорология связана с погодой, а климатология – с климатом.

**Погода** – это то, что происходит за окном в данный момент времени. Это мгновенный срез, фотография пространственного распределения совокупности **метеорологических величин**: давления, температуры, скорости ветра, влажности воздуха, облачности, осадков.

Удобным средством отображения текущего состояния атмосферы, то есть погоды, является ее представление в виде **синоптических карт**. На картах показаны осадки, линии атмосферных фронтов, закодированные в специальных значках данные метеорологических станций. Проведенные линии одинакового давления – это **изобары**. Кроме синоптических карт, которые все время обновляются из-за постоянно меняющейся погоды, есть и другие карты. В них отображена информация о приземном и приземном слое. Также существуют карты по высотным уровням, специализированные карты и т.д.

## Прогноз погоды (в том числе химической и биологической). Прогноз опасных явлений.

Если мы знаем состояние атмосферы в начальный момент времени, то мы должны от этого начального состояния провести экстраполяцию наших знаний на будущее с определенной заблаговременностью на определенное время.

Прогноз погоды можно выразить в виде формулы  $X_0 \rightarrow X_t$ , где  $X_0$  – начальное состояние атмосферы,  $X_t$  – момент времени  $t$ .

Качество прогноза должно зависеть от двух вещей:

- 1) Насколько хорошо мы знаем начальное состояние (начальные поля);
- 2) Как мы делаем экстраполяцию и насколько хорошо работает методика экстраполяции.

Для решения первой проблемы используются разные способы метеорологических наблюдений. Это и данные станций, и радиозонды, и спутниковая информация (не столько фотографии, сколько цифровые данные). Это и плавающие в океане буи, и

гражданская авиация, где самолеты снабжены датчиками, и радиолокаторы. Такую разнородную информацию, которая работает в своем режиме и темпе, охватывает разные территории, нужно собрать, объединить, натянуть на одну географическую сетку. Это делает специальная система, которая называется **система усвоения данных (data accumulation)**. Она собирает информацию со всего земного шара. Таким образом обеспечивается  $X_0$  - величина, которая характеризует состояние атмосферы в данный момент времени, от которого осуществляется прогноз.

А как делается экстраполяция? Она делается с помощью математического моделирования, то есть в качестве средства экстраполяции выступает модель, основанная на **уравнении термогидродинамики**. Эти уравнения основаны на «первых принципах»: законах сохранения энергии, массы, количества движения. На основе этих фундаментальных законов метеорологи строят «здание» метеорологии и климатологии.

Если у нас есть система наблюдения, система усвоения данных и математические модели, то все это соединяется вместе и непрерывно работает для того, чтобы прогнозы осуществлялись. Это технология, которая запущена, и человек в ней участия не принимает (только иногда в ней работает человек: на стадии метеонаблюдений, на стадии интерпретации и на стадии наладки отдельных узлов). Система непрерывно функционирует, и несколько раз за сутки от новых данных осуществляется старт и происходит прогнозирование погоды.

Наряду с обычным прогнозом, который идет в средства массовой информации, существуют не только физические, но и прогнозы **химической погоды**, то есть прогнозы загрязнения воздуха. Также прогнозы делаются на наличие в воздухе определенных аллергенов, то есть на определение **биологической погоды**.

В рамках общего прогноза погоды происходит прогнозирование **особо опасных явлений**. В последние годы частота катастроф увеличивается, причем главный вклад в этом изменении вносят гидрометеорологические явления (90% потерь происходит от этих явлений). Ситуация в России аналогичная, наблюдается тренд опасных погодных явлений.

Самые опасные гидрометеорологические явления – **тропические ураганы**. В Тихом океане они называются тайфуны. У всех на слуху события, связанные с прохождением урагана «Дориан» около Флориды. Это достаточно крупное образование, в котором работают механизмы разрушения с осадками и большими скоростями ветра – это комплексное опасное явление. Воздействие тропических ураганов проявляется и в бедных, и в богатых странах, но ущербы в этих странах разные. В богатых странах это, как правило, ущербы, связанные с огромными материальными потерями, а в бедных

странах это человеческие жизни. Например, при приближении урагана «Дориан» в США была организована эвакуация населения, люди уезжали в безопасные места. В бедных странах, таких как Бангладеш или Пакистан, и прогнозы не очень качественные, и информация не доводится до населения. Это ведет к большим человеческим жертвам – однажды в Бангладеш погибло 300 000 жителей за одну ночь.

В умеренных широтах для жителей городских территорий в последнее время особенно опасны **волны тепла**. Это сохраняющаяся в течении нескольких дней сильная аномалия жары. Такой эффект возникает из-за атмосферного переноса с юга, откуда тепло выносится в умеренные широты. Как правило, такая аномалия устанавливается на фоне антициклональных условий, когда отсутствуют осадки и облака. Самые тяжелые аномалии в Европе в последнее время связаны с волнами тепла. Жертвами экстремальных температур в России в 2010 стали 55 тысяч человек. Это сравнимо с потерями от тропических ураганов в Индии.

Другая проблема умеренных широт – это **наводнения**. Когда циклоны формируются непрерывно, вода стекает в реки, и они переполняются. Часть воды уходит в почву, но ее слишком много, поэтому она остается на поверхности. Таким катастрофическим образом себя ведет Амур и другие восточные реки.

Механизм образования опасных явлений понятен, но ученые пытаются выяснить причины их частого повторения. Считать катастрофические явления связанными с глобальным потеплением можно, но прямой физики явлений до конца не понимают.

### **Изменение климата. Необходимость синтетического подхода.**

Климатология – это наука, к которой можно и нужно относиться с **двух точек зрения**:

- 1) как к области метеорологии, которая описывает усредненное состояние метеорологических величин. С учетом сезонов из усреднения значений получают климатические показатели, типичные для разнообразия погод. При таком подходе климат понимается как осредненное состояние.

В таком традиционном виде климатология существовала столетиями. Древние арабы знали о муссонах в Индийском океане, а европейцы прекрасно знали, как на паруснике плыть в Америку.

Венцом климатических представлений являются карты классификации климатов, например, классификация климатов Алисова.

- 2) Второй подход появился недавно. Климатология – наука о термодинамическом состоянии внешних оболочек Земли и других планет. В отличие от метеорологии,

науке об атмосфере, климатология синтетическая, поскольку климат обладает многими определенными свойствами. Синтез проявляется во взаимодействии атмосферы, Мирового океана, криосферы, биоты, поэтому нужна такая наука, которая соединяет вместе знания разных наук. Климатология изучает термодинамическое состояние не только атмосферы, но и внешних оболочек и океана, и гидросферы, и суши, и даже биоты. Существует понятие глобального климата как планетарного свойства, характеризующего особенности всей планеты Земля, применимое и к другим планетам.

Почему надо было изменить представления человека о климатологии? Возникло представление о том, что климат меняется, и характеризовать его просто средним значением уже было бы неправильно. Среднее значение подразумевает, что мы смотрим на стационарный процесс и выбираем средний уровень флуктуаций, а если имеются тренды и закономерные изменения, то нужно эти изменения понимать.

Представления об изменениях климата существовали давно. Например, это знали геологи, которые сформулировали периодизацию геологических эр и периодов, так как изменение лика Земли сопровождалось изменениями климата. Однако климатологи считали, что это было так давно, что не несет никакого практического смысла. Когда же стали появляться представления о четвертичной геологии, то есть о десятках тысяч лет, сравнительно недавнем прошлом, то ученые поняли, что климат обладает способностью постоянно изменяться. Были открыты длиннопериодные и короткопериодные изменения, которые оказались достаточно сильными; тогда пришлось начать заниматься изучением изменения климата, появилась климатология как синтетическая наука и новое понятие климата.

Климат – это планетарный режим, в формировании которого участвуют разные среды (атмосфера, океан), это открытая система для внешних влияний, например, солнечной радиации. Если нас интересует генезис временных изменений климата и возможностей его прогнозирования, то нам важен второй подход.

В конце 1960-х появились **научные методы изучения климата.**

Приповерхностную температуру измеряют в будке на высоте 2-х метров. Это самый важный и хорошо измеряемый показатель. Однако собрать такой большой объем информации трудно, потому что нужно собрать с каждого региона одинаковое количество данных. Несмотря на это, было собрано даже три подобных ряда, один из них – с данными с 1880 года по 2019 год.



На основе собранной информации мы можем увидеть **глобальное потепление**. Оно не является регулярным, так как наблюдается ряд флуктуаций. Наряду с глобальным изменением за длинный период времени, когда в целом происходит рост температур, существуют волны (декадная изменчивость) и межгодовые колебания. Понять, почему происходят эти изменения, трудно, потому что каждый год Солнце освещает Землю одинаково и дает одинаковое количество энергии. Происходит приспособление климата к постоянному потоку солнечной энергии, но оно носит статистический характер, то есть приспосабливается режим, который может флуктуировать. Например, в довоенное время наблюдалось потепление Арктики, благодаря которому стало возможным более подробное изучение этого региона. Потом произошло снижение температуры, и, хотя парниковый эффект все время усиливался, климат стал холоднее, а начиная с 1970-х годов температура снова росла. В конце прошлого столетия 20 лет флуктуации были около среднего уровня, и появилась пауза глобального потепления. Причины этой стагнации непонятны, а далее произошел новый скачок потепления.

Также на изменения климата могут влиять течения, а именно явление Эль-Ниньо. При этом явлении значительная часть Тихого океана становится теплой, и происходит рост температур на всей планете. 2017 был самым теплым из годов, когда Эль-Ниньо не было.

Хотя отклонения от средних температур очень маленькие, их нельзя оценивать по абсолютной величине; нужно смотреть, к каким последствиям они приводят и какие климатические эффекты происходят за счет этих изменений.

За сто с небольшим лет уровень Мирового океана поднялся на 20 сантиметров, и этот эффект полностью обусловлен климатом. Вся инфраструктура в прибрежных регионах сосредоточена по побережью. Это в первую очередь дороги, портовые сооружения и т.д. Они были построены с расчетом на прежний уровень океана, но с его увеличением все становится подвластно стихии. Второй эффект – горное оледенение, где ледники отступают. Таким образом, опасные явления учащаются.

Что еще учитывает влияние климата?

- 1) Здоровье человека находится под угрозой из-за экстремальности погодных явлений. Опасна не столько жара днем, сколько ночью, так как если температура держится выше 24 градусов, то организм не отдыхает. Из-за изменений климата меняется окружающая среда и экосистемы, в нетипичных районах появляются малярийные комары и клещи.
- 2) Климат влияет на социальные и экономические показатели, особенно на климатически зависимые отрасли экономики. Например, при потеплении ЖКХ

тратит меньше энергии на отопление. В строительстве не нужны толстые стены, а с другой стороны, мерзлота тает, и стоящие на ней здания разрушаются. Также с климатом напрямую связаны сельское хозяйство, туризм, жизнь городского населения.

Климат тысячи лет назад влиял на социально-экономическую сферу древних государств. С изменением климата связан коллапс цивилизации Аккад в районе Междуречья, которое 4 тысячи лет назад распалось. Были восстановлены характеристики климата, и оказалось, что увлажнение было на одном уровне, но 4 тысячи лет назад оно резко ухудшилось, причем на довольно короткий промежуток времени. Проблемы с увлажнением повлияли на сельское хозяйство, а так как оно было основой государства, то цивилизация пришла в упадок. Раньше в Междуречье проникал влажный муссон с Индийского океана, но 4 тысячи лет назад с ним что-то произошло, и он перестал приносить влагу.

Другой пример – это цивилизация майя. В 800-900-х годах тоже было резкое увеличение засушливости, и древние майя понесли такой урон, что не вернулись к доаномальному уровню. Возможно, ослабление цивилизации привело к его быстрому захвату европейцами.

### **Источники информации.**

Информация о климате берется из данных **метеорологических наблюдений**. Если изменения короткопериодные, в масштабах десятилетий, то используются осредненные данные наблюдений. Для того, чтобы брать информацию о долговременных изменениях, используются **палеорекострукции**. Нужно найти в изучаемой среде показатели и характеристики, которые говорят об изменении климата, то есть нужны интерпретируемые показатели. Вторая задача заключается в необходимости определить абсолютную датировку и привязать изменения к абсолютному времени.

**Современное изменение климата** – это синтез антропогенно обусловленных изменений и природных вариаций.

В результате сжигания угля в атмосфере происходит усиление парникового эффекта, и нижняя часть атмосферы нагревается. Это двигатель современного потепления. Изменчивость климата – это сложная механика разных по масштабу его вариаций. Иногда в этих вариациях удается выделить квази-ритмы, которые называются мода изменчивости. В них прослеживается ритм, но с разными амплитудами и фазами (например, переход Эль-Ниньо в Ла-Нинья с периодичностью в несколько лет).

### **Суперкомпьютерное моделирование и прогноз климата.**

Если мы знаем генезис климата, имеем архивы, где можно проверять наши гипотезы, в том числе и палеоархивы, где мы можем проверять наши знания по изменению климата на основе климата прошлого, то можно ставить вопрос о **прогнозе климата**.

Прогноз может быть жестким, мягким и средним в зависимости от силы изменений.

По жесткому прогнозу средняя температура планеты будет составлять 4 градуса. В арктических районах произойдут сильные изменения, а над океанами поменьше. По мягкому сценарию изменения не столь существенные.

Прогноз погоды происходит в результате осуществления компьютерных экспериментов, путем работы сложных вычислительных комплексов. Прогноз – это математическая проблема, и задающим эффектом в сценарии является **изменение темпов выбросов парниковых газов**. Эти сценарии делаются научным образом, и иногда являются итогом работы целых институтов.

Модели для прогноза погоды и модели климата рассчитываются на основе уравнений термогидродинамики. Создается математическая модель климата, которая является очень сложной и не имеет аналитического решения, поэтому ее приходится решать численно. Численные решения осуществляются на компьютере. Поскольку модель очень сложна, то для ее вычисления нужны суперкомпьютеры. Успех и прогресс в прогнозировании погоды и климата во многом зависит от того, какая в руках у человека техника, поэтому каждое внедрение новых машин, новых систем и вычислительных методов сразу сказывается на качестве прогноза.

## Лекция 2

### Газовый состав воздуха. Аэрозоли.

Два самых главных компонента земной атмосферы – это **азот** и **кислород**, поэтому атмосферу нашей планеты иногда называют азотно-кислородной в отличие от углекислотной атмосферы Венеры и Марса или гелиево-водородной атмосферы Юпитера. И по объему, и по массе главными элементами являются азот (78 и 75% соответственно) и кислород (21% и 23%). Все остальные компоненты незначительны по массе, но именно из них многие будут нас интересовать. Малые примеси важны в метеорологическом отношении, и их вариации оказываются существенными для климатических изменений. Это **углекислый газ, метан, закись азота, вода, озон** – это главные газовые примеси, которые также называют **оптически активными**. Они определяют парниковый эффект.

**Аэрозоли** – это маленькие частички микронного размера (капельки, твердые частицы, или частицы, покрытые водяной пленкой). Они играют важную роль в погодных и климатических процессах, потому что они способны эффективно рассеивать (а иногда и поглощать) солнечную радиацию. Источники аэрозолей – сжигание топлива, сажа, вулканические извержения, пыль, морская соль, пыльца растений. Каждый из этих источников создает аэрозоли своего типа, которые отличаются оптическими свойствами. Например, сажа обладает способностью поглощать солнечную радиацию и ту радиацию, которая поднимается от поверхности Земли. Сажевый аэрозоль играет активную роль в формировании парникового эффекта. Вулканический аэрозоль эффективно отражает солнечную радиацию, поэтому при крупных вулканических извержениях он обеспечивает уменьшение поступления энергии к Земному шару, что приводит к снижению температуры. Таким образом, аэрозоли – это облака маленьких частиц разного происхождения с разными свойствами, которые необходимо учитывать.

### Вертикальная структура атмосферы.

Солнечные лучи достаточно свободно проходят сквозь атмосферу, не нагревая ее. Они активно рассеиваются и отражаются, но поглощение фотонов, которое приводит к нагреванию среды, не дает значительного эффекта. Солнечная энергия нагревает земную поверхность, а от нее в свою очередь нагревается атмосфера. Получается, что атмосфера нагревается снизу, значит, **температура в атмосфере должна убывать с высотой**.

Интересно, что атмосфера нагревается снизу, а Мировой океан – сверху. Теплые частицы воздуха, примыкающие к поверхности, способны подниматься вверх и осуществлять перемешивание в атмосфере. То, что океан нагревается сверху, означает, что к его поверхности примыкают более легкие частицы, которые не могут погрузиться вниз, поэтому вода не перемешивается.

Итак, температура у поверхности Земли действительно убывает с высотой. Постепенно падение температуры сменяется постоянным ходом температуры, и такие слои в атмосфере называются «**изотермия**». Дальше температуры начинают расти, но этот рост уже не может быть связан с поверхностью. В более высоком слое расположен источник тепла – озон. Этого газа очень мало, но он эффективно поглощает ультрафиолетовую часть солнечного спектра, а также часть земной радиации. Из-за **радиационного эффекта** происходит нагревание воздуха в той части атмосферы, которая содержит озон.

Озоновый слой заканчивается, и дальше с высотой температура снова начинает убывать, так как мы снова удаляемся от источника тепла. В верхней атмосфере, на высоте около 100 километров, температура снова растет, но здесь разогревание происходит из-за вторгающегося сюда солнечного ветра, коротковолновых потоков радиации.

В зависимости от вертикального распределения температуры атмосфера расчленяется на слои. Нижний слой, где происходит убывание температуры, называется **тропосфера**. Слой, в котором температура увеличивается, называется **стратосфера**. Следующий слой с новым убыванием температуры – **мезосфера**, а самый верхний слой называется **термосфера**. Слои изотермии, которые располагаются, например, между тропосферой и стратосферой, называются словом «пауза» - тропопауза; стратопауза находится между стратосферой и мезосферой.

На других планетах имеется определенная общность строения атмосфер. Везде происходит сначала падение температуры с высотой, потом замедление этого падения, изотермия и рост температуры. Так выглядят атмосферы Венеры, Марса, Титана и Юпитера. Однако только на Земле есть область, осложняющая профиль, связанная с озоном. Общность строения атмосферы говорит о том, что физика процессов на планетах одинаковая. Главное отличие заключается в температуре от поверхности. На Земле она составляет примерно 300 К, а на Венере – 700, на холодном Титане – 90 К. Протяженность тропосферы также разная, но схема в целом одинакова для всех планет.

### **Плотность.**

Плотность воздуха измеряется в килограммах на кубический метр. У поверхности Земли плотность составляет примерно **1,2 кг/м<sup>3</sup>**, выше она быстро убывает, а на высоте 20 километров 90% атмосферы находится внизу. Таким образом, атмосфера – это тонкая пленка, натянутая на всю планету. Радиус Земли составляет примерно 6400 километров, а эффективная толщина атмосферы – всего около 10 километров. То же самое относится к Мировому океану, средняя глубина которого – 4 километра; это тончайшая пленка воды, натянутая на планету.

### Атмосферное давление.

**Давление** – это сила, которая приходится на единичную площадь. Сила измеряется в ньютонах, а площадь – в квадратных метрах. Размерность давления Н/м<sup>2</sup> называется паскаль. В зависимости от массы, плотности и распределения атмосферы с высотой среднее давление атмосферы Земли равно 10<sup>5</sup> Па – типичное атмосферное давление. Метеорологи измеряют давление не в паскалях, а в гектопаскалях, и тогда типичное давление составляет **10<sup>3</sup> гПа**. Так как почти вся масса атмосферы привязана к поверхности Земли, то получается, что давление с высотой убывает. На высотах порядка 30 километров воздуха так мало, что давление близко к нулю, примерно в тысячу раз меньше, чем у поверхности Земли.

Убывание давления с высотой описывается **барометрической формулой**:

$$p_2 = p_1 \exp\left(-\frac{g(z_2 - z_1)}{R\hat{T}}\right),$$

где  $p_2$  – это давление на уровне  $z_2$ ,  $p_1$  – давление на уровне  $z_1$ ,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\hat{T}$  – средняя температура слоя между высотами 2 и 1,  $R$  – универсальная газовая постоянная для воздуха.

Эта формула не эмпирическая, а теоретическая, поэтому ее можно вывести.

Из барометрической формулы можно выразить высоту. Тогда получится, что высота при некотором давлении  $p$  над поверхностью Земли определяется **формулой геопотенциальной высоты**:

$$z_p = \frac{R\hat{T}}{g} \ln \frac{p_s}{p}$$

Эта формула весьма точная, и до последнего времени на летательных аппаратах датчики высоты работали на этом принципе.

Атмосферное давление – это важный показатель, который наносится на карты и характеризуется изолиниями давления (**изобарами**). Эти линии проведены через одинаковые значения давления по данным метеорологических станций. Изобары иногда замыкаются и образуют области низкого или высокого давления. Низкое давление ассоциируется с циклонами, высокое – с антициклонами. Иногда в умеренных широтах давление меняется из-за пришедших с юга тропических ураганов. Все тропические ураганы Атлантики формируются из волн, которые идут со стороны западной Африки. При подходе к Карибскому району они начинают активизироваться,

и далее их путь может быть разным. Некоторые из них идут к Флориде и или умирают, выйдя на континент, или описывают дугу и выходят в умеренные широты. На прогностических картах может быть показан дальнейший путь этих ураганов, которые превращаются в ураганы умеренных широт. Прогностическая карта – это результат математического моделирования.

Рассмотренные нами характеристики воздуха – температура, плотность и давление – связаны **уравнением состояния**:

$$p = R\rho T,$$

где  $R = 287$  Дж/ (кг · К) – удельная газовая постоянная для сухого воздуха. Эта цифра получается из-за того, что воздух почти полностью состоит из азота и кислорода.

Такое уравнение записывается для идеального газа.

#### **Водяной пар. Парциальное давление. Относительная влажность.**

Понятие «влажность» относится к водяному пару, который есть в воздухе. Водяной пар почти не определяет массу и объем атмосферы, но он важен для жизни на Земле. В формировании метеорологического режима и климата он также играет значительную роль, потому что может испаряться конденсироваться, выделяя и забирая энергию.

Типичное давление  $10^3$  гПа создается совместным действием всех компонентов воздуха. Если мы хотим охарактеризовать какой-то газ, находящийся в атмосфере, то нужно посмотреть, какое давление он оказывает. Это давление называется **парциальным**; это та часть общего давления, которое создается данным газовым компонентом.

В соответствии с уравнением состояния давление, создаваемое водяным паром ( $e$ ) может быть описано по формуле:

$$e = R_{H_2O} \rho_{H_2O} T,$$

где  $R_{H_2O}$  – газовая постоянная для водяного пара,  $\rho_{H_2O}$  – плотность водяного пара и  $T$  – температура.

Для характеристики водяного пара обычно используют не только его парциальное давление, но и **удельную влажность**. Ее можно выразить из формулы  $e = R_{H_2O} \rho_{H_2O} T$ . Это же соотношение напишем для воздуха:  $p = R\rho T$ . Теперь разделим  $e$  на  $p$ :

$$\frac{e}{p} = \frac{R_{H_2O} \rho_{H_2O}}{R\rho} = \frac{461\rho_{H_2O}}{287\rho}$$

$$q = \frac{e}{p} \cdot 0,622,$$

где  $q$  – удельная влажность, безразмерная величина, которая показывает, сколько килограммов водяного пара содержится в килограмме воздуха. Удельная влажность и парциальное давление водяного пара характеризуют количество водяного пара в атмосфере. Такой подход можно применять к любой газовой примеси.

Вода на Земле может находиться в **трех фазовых состояниях**: твердом (лед), жидком (вода) и газообразном (водяной пар). Так бывает не на каждой планете, потому что на очень жаркой Венере вода не может быть ни в твердом, ни в жидком состоянии. На холодном Марсе вода может быть в твердом и газообразном состоянии. На Земле вода находится в океанах, ледниках и в атмосфере – примеры ее разных агрегатных состояний. Для характеристик фазовых переходов используется фазовая диаграмма воды, которая отражает равновесное состояние фаз воды в системе координат температура-давление. Понятие «равновесие» значит, что при рассмотрении разных фазовых переходов нужно дождаться окончания всех переходных процессов. В реальности такое состояние бывает не всегда, например, при температуре ниже 0 градусов вода еще может находиться в жидком состоянии. В определенный момент все три фазы – твердая, жидкая и газообразная – могут совпадать, и для воды он проявляется при температуре 0 и давлении 6,1 гПа.

Если мы рассмотрим отношение парциального давления водяного пара и давления, при котором водяной пар находится в насыщенном состоянии, то мы получим относительную влажность воздуха.

$$f = \frac{e}{E}$$

Это не характеристика количества пара, а степень его близости или удаления по отношению к состоянию насыщения. Когда воздух насыщен, в нем появляются капельки воды (облака, туман), при этом относительная влажность считается стопроцентной или равной единице. Давление водяного пара в состоянии насыщения хорошо описывается эмпирической формулой. Фазовый переход сопровождается явлениями конденсации или испарения.

Рассмотрим пример. При охлаждении теплого воздуха за ночь утром образуется туман. Пусть днем температура была +30°C, а парциальное давление было равным 20 гПа. К



вечеру температура снижается, а количество пара при спокойном состоянии погоды остается прежним. Когда температура опускается до  $+17^{\circ}\text{C}$ , водяной пар оказывается в насыщенном состоянии. При этом в атмосфере начинают появляться капельки, которые мы видим из-за того, что на них рассеивается свет, — это туман. Если происходит дальнейшее охлаждение воздуха, то избыток водяного пара превращается в капли. Облака образуются примерно таким же образом, только процесс охлаждения воздуха иной.

Воздух содержит в себе водяной пар, но мы можем оценить максимальное возможное его содержание, и эта величина определяется величиной насыщения. При  $+30^{\circ}\text{C}$  максимальное парциальное давление может быть больше 40 гПа, а при  $-10^{\circ}\text{C}$  максимальное давление водяного пара – 5 гПа. При низких температурах воздух может содержать гораздо меньше водяного пара, чем при высоких. Именно поэтому мощные осадки преобладают в низких широтах. В теплых воздушных массах содержится больше водяного пара, который потенциально может сконденсироваться и выпасть, а в Арктике и тем более в Антарктиде водяного пара почти нет, а если его содержание увеличивается, он тут же конденсируется. При низких температурах воздух не может удержать пар. Если в низких широтах водяного пара в воздухе потенциально много, то выпадают обильные осадки, которые идут на питание рек. Все могучие реки мира берут свое начало в тропиках (Амазонка, Конго, Нил и другие). В высоких широтах большие осадки невозможны по определению, потому что воздушная масса холодная. То же самое можно сказать про лето и зиму. Однако и в тропиках есть засушливые зоны, есть зоны с большими осадками, то есть в атмосфере работают и другие механизмы, которые регулируют осадкообразование, но необходимым условием, определяющим возможность выпадения осадков, является распределение температур.

## Лекция 3

При рассмотрении нами синоптических карт мы будем чаще всего пользоваться немецкими картами. Они удобны своей картографической проекцией и тем регионом, к которому они относятся: Атлантика, Европа и часть Арктики. Погода, которая формируется в этом регионе, влияет на формирование погоды в центральной части Восточно-Европейской равнины. В поле давления хорошо видны погодные системы циклонов и антициклонов, которые являются ключевыми в интерпретации погодных условий. Линии равного давления, или изобары, не только характеризуют области высокого и низкого давления, но и являются линиями тока воздуха. Линиями на карте обозначаются атмосферные фронты, которые разделяют воздушные массы.

### Распределение энергии в спектре Солнца.

**Атмосферная радиация** – это электромагнитные волны, находящиеся в атмосфере. Происхождение этого излучения может быть разным: излучение Солнца, излучение любого нагретого тела.

Мы живем в Солнечной системе. Солнце испускает энергию, так как в его глубинах происходит реакция термоядерного синтеза, в результате которой 4 атома водорода непрерывно превращаются в гелий, и при этом выделяется огромное количество энергии. Эта энергия уходит из центральной области звезды сначала в виде электромагнитного излучения, а потом поглощается средой. Центральная область, где происходят реакции, окружена нагретой зоной, которая непрозрачна для электромагнитного излучения. Далее из этой нагретой области тепло переносится в верхние слои нашей звезды, но уже не радиационным способом, а перемешиванием. Нагретые в глубине массы солнечного вещества всплывают как более легкие, а от поверхности опускаются менее нагретые. Этот механизм переноса универсален и работает и на Солнце, и в океане, и в атмосфере. Он называется **конвекция**.

В результате конвекции из поверхностных слоев (фотосферы) происходит **излучение электромагнитных волн**. Тот избыток тепла, который все время возникает внутри звезды, сбрасывается, и таким образом звезда находится в стационарном состоянии. Электромагнитное излучение Солнца попадает и на нашу планету, обеспечивая ту энергию, которая движет все. Часть этой энергии превращается в кинетическую энергию циркуляции океана и атмосферы, основная часть идет на нагревание, часть идет на фотосинтез.

Электромагнитное излучение определено в широком диапазоне длин волн. Есть монохроматическое излучение, которое относится строго к определенной длине волны. **Солнечный спектр** – это смесь разных длин волн. Существует прибор, который называется спектрометр, и с его помощью мы можем измерять энергию, относящуюся к

разным интервалам длин волн. На графике по оси ординат можно отложить величины, связанные с энергией, измеряемые в ваттах на м<sup>2</sup> на микрон ( $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм}}$ ,  $\text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ ). По оси абсцисс откладывается длина волны в микронах (мкм). Если мы хотим получить представление об энергии, поступающей в определенный интервал, то мы должны выбрать энергию, относящуюся к интервалу, и посчитать площадь в  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , относящуюся к спектральному диапазону. Чтобы посчитать, сколько всего энергии приходит от Солнца, нужно посчитать площадь под полученной кривой.

Диапазоны длин волн имеют свои названия; один из них – **область видимого света** (0,4 – 0,76 мкм) приходится на пик солнечного спектра. Из-за комбинации видимых электромагнитных волн мы воспринимаем цвет. Волны других диапазонов мы не видим. Более короткие волны ультрафиолетовые, более длинные – инфракрасные. Однако такие волны дают Земле мало энергии.

Наша звезда, Солнце, относится к классу желтых карликов. Концентрация его вещества уменьшается при подъеме к поверхности, и звезда как газовый шар все время расширяется за счет верхних слоев. Улетающее в космос вещество называется солнечный ветер. К Земле приходит электромагнитное излучение, которое приносит энергию, и солнечная плазма. Если на Солнце происходят вспышки, то мощность солнечного ветра увеличивается, и вещество приходит к Земле примерно через трое суток. Из-за наличия магнитного поля солнечный ветер обтекает нашу планету.

### **Основы теории радиации. Спектр абсолютно черного тела. Закон Планка. Закон Стефана – Больцмана. Закон Вина.**

**Интенсивность ( $I_\lambda$ )** – это понятие, которое характеризует энергию электромагнитных волн. Она характеризует количество лучистой энергии в определенном диапазоне длин волн (монохроматическая интенсивность) на единичную поверхность (м<sup>2</sup>) за единицу времени (с) внутри единичного телесного угла. Это значит, что на небосводе есть определенная область, из которой энергия приходит в конкретную точку, где находится прибор, то есть из всего пространства мы «вырезаем» область, интересующую нас. Если нас интересуют более крупные области, откуда может приходить энергия, то мы должны просуммировать все объекты. В таком случае мы перейдем к понятию потока и **плотности потока**. Если поток приходит из верхней полусферы (полусферический поток), это значит, что из каждой точки небосвода приходит рассеянная радиация.

Телесный угол определяется так: наблюдатель стоит в точке О, а объект, который испускает радиацию, находится от него на расстоянии R. Вокруг наблюдателя имеется сфера, и на этой сфере вырезается объект определенной площади. Телесный угол представляет собой долю площади большой сферы. Если мы рассмотрим пример Солнца, то расстоянием с Земли до него будет равно r, сечение солнечного диска, из

которого приходит энергия,  $\pi r^2$ , где  $r^2$  - радиус Солнца. Возьмем отношение  $\frac{\pi r^2}{r^2}$ , которое будет равно телесному углу.

Площадь солнечного диска надо разделить на квадрат расстояния до Солнца:

$$\frac{\pi(6,96 \cdot 10^8 \text{ м})^2}{(1,5 \cdot 10^{11} \text{ м})^2} = 6,76 \cdot 10^{-5} - \text{столько радиан занимает диск при наблюдении с Земли.}$$

Полученную цифру можно сопоставить с телесным углом всей верхней полусферы, который равен  $2\pi$ .

Хорошей моделью, описывающей радиационные процессы, является **абсолютно черное тело** – физическое тело, которое поглощает всю поступающую на него энергию, ничего не отражая. Оно испускает радиацию только в зависимости от температур. Еще в XIX веке понимали, что чем больше нагрето тело, тем больше оно испускает энергии. Были эмпирические представления, что поток энергии пропорционален температуре. Однако для каждого тела существуют свои законы, поэтому было введено абстрактное понятие абсолютно черного тела, излучение которого зависит только от его температуры. Эта модель оказалась применимой ко многим объектам. Если любое тело нагрето выше абсолютного нуля по Кельвину, то оно излучает электромагнитные волны, которые близки к закону распределения для абсолютно черного тела с такой же температурой. Закономерность распределения излучения описывается по формуле **закона Планка**.

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (\exp(\frac{hc}{k\lambda T}) - 1)},$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана,  $c$  – скорость света,  $\lambda$  – длина волны,  $T$  – температура.

Энергия, испускаемая всем телом, пропорциональна площади под кривой, поэтому чем больше температура, тем больше площадь. Ее размерность – число, умноженное на  $10^7$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср мкм}}$  (ср – стерадиан на единичный телесный угол).

Чтобы вычислить полную энергию, нужно проинтегрировать выражение закона Планка. В результате мы получим выражение **закона Стефана-Больцмана**:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4, \text{ где } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$$

Следовательно, полная энергия, которую испускает абсолютно черное тело, пропорциональна его температуре в четвертой степени.

Абсолютно черное тело – это тело, излучение которого определяется формулой Планка. Это излучение можно представить так: пусть имеется тело, которое испускает радиацию, а спектрометром измерим длину каждой волны, испускаемой телом. Посмотрим, соответствует ли распределение спектра кривой Планка или не соответствует. При этом нужно зафиксировать температуру так, чтобы она была одинаковой в процессе измерений. Очень хорошей моделью излучения абсолютно черного тела является тающий снег, который дает почти точное приближение к планковской кривой с температурой 273 К.

В метеорологии приходится тестировать приборы, и в качестве хорошего теста, который позволял получить планковскую кривую, использовался тающий снег.

Чем выше температура, тем в более короткие длины волн смещается максимум на планковской кривой. Например, при температуре 5000 К максимум приходится примерно на 0,5 микрона, а на кривой в 3000 К максимум уже ближе к единице. Это значит, что если объект имеет температуру 5000 К, то максимум излучения приходится на желто-красные длины волн, следовательно, и спектр окрашивается в такие цвета, и мы воспринимаем объект окрашенным в оранжевый цвет. При температуре 3000 К мы имеем в видимом диапазоне только маленький фрагмент красного цвета. Для объекта температурой 273 К излучение было бы в не видимой нами области. Закон сдвига максимума в спектре излучения называется **закон Вина**.

Кривая солнечного спектра похожа на кривую излучения абсолютно черного тела. Мы подбираем температуру так, чтобы кривая максимально аппроксимировала реально измеренной. Если мы используем температуру фотосферы, при которой формируется солнечное излучение, то получим близкое соответствие. Такой способ используется для определения температуры фотосферы разных звезд. Астрономы измеряют распределение энергии в спектре и подбирают планковскую кривую температуры, которая этому распределению соответствует. Есть коричневые карлики, красные гиганты, голубые звезды – их названия несут в себе информацию о температуре. У голубой звезды спектр сдвинут дальше в голубую область, то есть температура ее фотосферы может быть 20 000 К. Если это красная звезда, то у нее температура снижена до 3000 К.

Чтобы подобрать планковскую кривую, нужно было не просто подобрать правильное распределение. Нужно было подобрать ее таким образом, чтобы значение энергии соответствовало измеряемому потоку радиации. Этот подбор осуществляется с учетом

телесного угла. Таким образом, мы подбираем форму планковской кривой, которая относится к единичному телесному углу, и умножаем на реальный телесный угол.

Кривая солнечного спектра неровная. Солнце испускает энергию из фотосферы. В верхней части атмосферы Земли летает спутник, на котором установлен спектрометр, измеряющий приходящую энергию в разных спектральных интервалах. Фотосфера излучает энергию чисто по закону Планка, но потом это излучение проходит через прилегающую к фотосфере атмосферу Солнца. В ней имеются разные соединения, и некоторые из них способны поглощать определенную энергию. Есть газы, которые поглощают энергию селективным образом, в узком диапазоне. Поэтому при проведении измерений на Земле мы видим снижение радиации в конкретных диапазонах и получаем кривую с провалами. Эти длины волн называются **фраунгоферовы линии** по имени ученого, который их впервые установил, и они дают нам информацию о химических элементах, имеющих на Солнце. Глядя на спектр поглощения и глубоко изучив, какие материалы поглощают радиацию в каком спектральном интервале, можно составить представление о наличии или отсутствии элемента. Этот метод называется **спектроскопическим**.

С верхней границы атмосферы солнечная энергия поступает вглубь планеты и проходит через мутную среду, где происходит ослабление радиации. Часть энергии при прохождении атмосферы поглощается, но это поглощение неодинаковое в разных длинах волн, например, озон поглощает почти все ультрафиолетовое излучение. Часть поглощается кислородом и водяным паром.

Солнечная радиация, достигшая атмосферы, называется атмосферной радиацией. Радиация бывает прямая и рассеянная (диффузная). Прямая радиация – это те прямые солнечные лучи, которые приходят непосредственно от источника. Рассеянная радиация – это те же самые солнечные лучи, которые рассеялись в атмосфере и облучают нас. Солнечные лучи приходят к каждой точке небосвода и на пути встречаются определенные характеристики среды, которые приводят к рассеиванию. Каждая точка небосвода «поджигается» прямыми солнечными лучами, и сама становится источником рассеянного света. На Луне нет рассеянной радиации; нет ее и в космосе, который ничего не излучает. Атмосфера – это **мутная среда**. Это газовая смесь, в которой происходят флуктуации плотности и, следовательно, рассеивание света. Кроме этого, в эту среду включены разные аэрозоли – пылевые, дымовые, биологические и другие, на которых тоже происходит рассеивание. Облака – это тоже аэрозоли. Все эти элементы создают мутность среды, в которой происходит рассеивание радиации и ее поглощение. Когда луч света встречает частицу, то энергия рассеивается. Квант энергии полностью поглощается объектом, и в тот же момент энергия перераспределилась по всем направлениям, то есть рассеялась, и

распределение энергии может быть разным. При поглощении частицей энергия преобразуется в тепло и никуда не уходит.

## Лекция 4

Электромагнитное излучение в атмосфере называется **атмосферной радиацией**. Мы ввели удобное понятие **абсолютно черного тела**, так как его излучение не зависит от особенности этого тела, а зависит только от его температуры. Эта модель хорошо применима к реальным объектам в атмосфере, на поверхности океана или суши. Следовательно, мы можем абстрагироваться от того, что излучает энергию, а смотреть только на температуру объекта. **Закон Планка**, отраженный на планковских кривых, дает распределение энергии в спектре Солнца. **Полная энергия излучения** — это площадь под кривой. Если нас интересует какая-то определённая область, например, мы бы задались целью узнать, сколько энергии находится в видимом диапазоне, мы должны были бы определить площадь, относящуюся к выделенному интервалу. Спектр, где присутствуют все длины волн без разрывов, испускается непрерывно. Мы можем объяснить свойства солнечного излучения, рассматривая модель абсолютно черного тела.

### **Мутная среда. Атмосферная радиация: пропускание, отражение, поглощение слоем. Прямая и рассеянная (диффузная) радиация.**

Пусть в атмосфере имеется некое тело и слой в атмосфере, на который поступает поток радиации  $Q$ . Эта энергия может относиться к определенному интервалу или ко всей области спектра. Интегральная радиация – это полная энергия излучения. Если мы рассматриваем в этом же спектре какой-нибудь диапазон, относящийся к определенной длине волны, тогда мы говорим о спектральной, или селективной, радиации. Поступившая радиация может отражаться, поглощаться или проходить насквозь. Отражается  $R$  - количество энергии, характеризующая те длины волн, которые отразились,  $T$  – количество поглощенной энергии и  $A$  – проходящей. В этом случае закон сохранения энергии записывается так:

$$R + T + A = Q$$

В реальности отражение радиации происходит от облаков диффузным образом, то есть по всем направлениям. Ее спектральный состав соответствует солнечной радиации. Радиация, которая прошла облако насквозь, тоже рассеивается по всем направлениям. Поглощенная радиация в каком-то смысле поглотилась навсегда. Конечный эффект поглощения радиации - переход её в тепло с добавкой температуры. Далее тело начинает испускать радиацию как нагретое. Поглотившаяся энергия солнечного излучения воплощается в энергию, которое тело испускает в виде тепловой радиации.

Если в выражении закона сохранения энергии каждое слагаемое разделить на  $Q$ , то в правой части получим единицу.

$$\frac{R}{Q} + \frac{T}{Q} + \frac{A}{Q} = 1$$



Отношение  $\frac{R}{Q}$  называется **альбедо**. Альбедо — это важная характеристика отражательных свойств объектов. Это отношение пришедшего потока радиации к тому, который уходит, выраженное в энергетических единицах. Альбедо естественных поверхностей бывает разным. Свежий снег имеет альбедо 70%, грязный снег в городе - 40%, у чернозема - 10%. Самое маленькое альбедо у вод Мирового океана - всего 5%. Радиация, попавшая в воду, начинает многократно рассеиваться до тех пор, пока не встретит какую-либо частицу, которая ее поглотит. Фотон, рассеиваясь случайным образом, выйдет из водной поверхности, поэтому океан работает как мощный поглотитель радиации и нагревается от Солнца.

Перейдем к следующим понятиям. Пусть на объект, на который светит Солнце, поступает прямая солнечная радиация. На нашу атмосферу поступает параллельный пучок солнечной радиации. В каждой точке происходит процесс рассеяния. Энергия, которая поглотилась частицей, рассеивается и потом испускается вновь, но по некоторому специфическому по закону. Рассеяние радиации происходит в разные стороны. К Земле приходит прямая радиация  $I'$ , а рассеянная радиация приходит со всего небосвода. На наблюдателя светит диск Солнца, который посылает прямую радиацию на весь небосвод. Рассеянная радиация обозначается  $D$ , а суммарная радиация –  $Q$ ,  $Q = I' + D$ . Понятия пропускания, поглощения, отражения и рассеяния относятся к суммарной радиации, а не к прямой.

Процессы рассеяния зависят от того, как соотносятся длина волны с размером тех частиц, которые определяют это рассеяние. Для понимания этого представим себе, что волна бьётся в берег и затем от него отражается. В случае, когда длина волны гораздо меньше, чем объект, в который она врежется, действует закон геометрической оптики. Другая ситуация происходит, когда длина волны гораздо больше размеров частиц, и механика прохождения волн через среду другая. В оптике этому явлению соответствует **рэлеевское рассеяние**  $I_\lambda \sim \lambda^{-4}$ , где рассеяние обратно пропорционально длине волны в четвертой степени, следовательно, **наилучшим образом рассеиваются короткие длины волн**. Лучше всего рассеивается ультрафиолет, который мы не видим, а в видимом спектре - фиолетовые, синие и зеленые. Когда формируется рассеянное излучение, то энергия, заложенная в видимый спектр, относится к фиолетовой и синей области спектра, поэтому небо имеет синюю окраску. Если длина волны и размеры частиц близки, то происходит самое эффективное рассеяние.

Все перечисленные выше законы относятся к понятию однократного рассеяния. Это значит, что солнечные лучи приходят, потом один раз рассеиваются, и это рассеянное излучение приходит нам в глаз. Многие эффекты в атмосфере хорошо описываются однократным рассеянием. В океане же происходит многократное рассеяние, то есть фотон встречает на своем пути оптически плотную мутную среду. В атмосфере примером таких сред, которые обеспечивают многократное рассеяние, являются облака. Облака почти не поглощают солнечную радиацию, но очень эффективно ее

рассеивают. В результате многократного рассеяния тот свет, который выходит из этого облака, устроен таким образом, что облака окрашены в белый или серый цвет. Это признаки того, что происходит неселективный процесс, потому что при селективном процессе какая-то длина волны преобладает при прохождении. Из облака все длины волн выходят примерно с одинаковой интенсивностью, и это называется белый цвет.

Когда мы говорим о частицах, маленьких по сравнению с длиной волны (длина волны - десятые доли микрона), то мы вспоминаем Рэля. В своей классической работе он считал, что это молекулы, и получил формулу, которая оказалась правильной. В дальнейшем было уточнено, что в газовой среде происходят скопления или, наоборот, области уменьшения плотности. Такие микро-флуктуации всё время присутствуют в атмосфере и обеспечивают рэлеевское рассеяние. Так как Рэлей относил это рассеяние к молекулярному, этот термин остался как синоним. Более крупные частицы в атмосфере, сопоставимые с длиной волны, — это аэрозоли. Это частицы разного происхождения, в основном микронного размера: пыль, частицы морской соли, которые взлетели с поверхности моря, частицы, возникшие в химических реакциях, происходящих в вулканических выбросах, и так далее.

#### **Уравнение радиации: формула Бэра-Буге-Ламберта.**

Процесс распространения излучения можно описать количественно. Мы имеем направленную радиацию интенсивностью  $I_\lambda$ , относящуюся к определенной длине волны. Эта радиация приходит в мутную среду, в которой мы рассматриваем только маленький кусочек  $dS$ . Когда радиация проходит мутную среду, то она ослабевает:  $I_\lambda - dI_\lambda$ , то есть через среду не прошла. Рассмотрим относительное изменение  $\frac{dI_\lambda}{I_\lambda}$  радиации, потерявшей в слое, относительно той величины, которая поступала. Нужно, чтобы это изменение было пропорционально толщине слоя, а также нужно учесть физические характеристики:  $\frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = -k\rho dS$ , где  $k$  – коэффициент ослабления, а  $\rho$  - плотность среды. В зависимости от толщины слоя теряется радиация, то есть она поглощается или рассеивается.  $D$  характеризует маленькие приращения как дифференциалы, то есть бесконечно малые приращения. Эта формула представляет собой основу **закона Бэра-Буге-Ламберта**. Если мы проинтегрируем это уравнение, то получим формулу  $I_\lambda = I_{\lambda,0} \exp(-k_\lambda u)$ . Этот закон показывает, что если на какой-то слой, уже не бесконечно малый, а конечно, определенного размера, падает радиация, то у поверхности ослабление радиации описывается таким законом экспоненциально. Прямая радиация ослабляется таким простым образом. Так проходит свет через перистые облака и безоблачную атмосферу. Труднее учесть эффект диффузности, потому что рассеянный свет идет от разных направлений. В формулу нужно добавить интеграл, собирающий информацию по всему небосклону. В этом уравнении нет радиации, которую испускают другие объекты, то есть мы рассматриваем радиацию, относящуюся к определенному выбранному интервалу длин волн, не переходя к интегральному потоку.

## **Излучение. Излучение поверхности Земли. Излучение молекулами газа. Окно прозрачности.**

Солнечная радиация сопоставима с излучением абсолютно черного тела при температуре около 6000 К, и она занимает интервал до 3 мкм. Типичная температура планеты – 273-280 К, поэтому для земной радиации максимум на планковской кривой широкий и маленький. Эти потоки радиации находятся в разных диапазонах и никак не перекрываются, поэтому мы можем рассматривать отдельно процессы переноса радиации. Как синоним понятия «солнечная радиация» мы будем использовать понятия коротковолновой радиации, а для земной радиации - длинноволновой радиации. На планете Венера ситуация другая. Спектр солнечной радиации на ней тот же самый, а спектр венерианской радиации формируется при температурах примерно 700 К, поэтому области спектров бы пересекались. Следовательно, на Венере не существует понятий коротковолновой и длинноволновой радиации.

В спектре земной радиации из-за больших длин волн рассеяние становится очень маленьким. Солнечная радиация проходит сквозь облака и атмосферу, сквозь среду, температура и собственное излучение которой находятся в совершенно другом спектральном диапазоне. Рассматривая прохождение солнечной радиации, мы совершенно не учитываем, что среда сама способна излучать энергию. Если сквозь среду проходит длинноволновая радиация, то мы должны принципиально учитывать, что у нас есть поток радиации, сформировавшийся при таких же температурах. Поток проходит сквозь среду, которая сама поглощает и излучает радиацию в том же интервале. Максимум излучения по планковской кривой приходится на интервал 10-20 мкм.

Пусть у нас имеется поверхность, которая испускает излучение при температуре земной поверхности  $T_S$ , например, 300 К. В тот момент, как радиация испускается, её энергия равняется  $\sigma T^4$  по закону Стефана-Больцмана, а распределение энергии происходит по закону абсолютно черного тела по формуле Планка, соответствующей температуре 300 К. Волны очень длинные по сравнению с размером флуктуаций, встречающихся на их пути, поэтому процесса рассеивания не происходит. Атмосфера представляет собой слои воздуха с близкой по значениям температурой. Каждый слой тоже испускает радиацию, причём каждый слой испускает радиацию и вверх, и вниз. Восходящий поток почти сразу попадает в свой воздух, частично или почти полностью поглощается в нём, но этот слой испускает радиацию сам, то есть выше поднимается совместный поток. Этого нет в случае солнечной радиации, потому что атмосфера не излучает в диапазоне солнечной энергии. Происходит поглощение энергии и ее излучение самим слоем.

В газовой среде молекулярное поглощение устроено селективно, то есть поглощаются не все длины волн, приходящие в данную среду, а поглощение происходит выборочно. У поверхности Земли излучение характеризуется планковской кривой, а затем оно

попадает в слои атмосферы, и некоторые области спектра поглощаются. На внешней границе атмосферы получается «изъеденная» кривая. «Съедает» радиацию углекислый газ вместе с водяным паром. Поглощение  $\text{CO}_2$  работает при длине волны 15 мкм. В интервале 8-12 мкм на внешней границе атмосферы радиацию не поглощает ничто, кроме озона. Эта область называется **окно прозрачности**. Именно здесь открыто «окно», через которое получается уход радиации.

### **Уравнение Шварцшильда.**

Уравнение Бэра-Буге-Ламберта характеризует ослабление радиации в слое. Также нужно учесть, что среда сама излучает радиацию в том же спектральном диапазоне по закону Планка.

$$\frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = -k\rho dS + B_\lambda$$

Это **уравнение Шварцшильда**.

### **Альбедный и парниковый эффект.**

От Солнца приходит суммарная радиация, сильно рассеиваясь в атмосфере, но поглощение сравнительно невелико. К поверхности Земли приходит много радиации, больше 80%, и в лучшем случае только 20% будет поглощено в атмосфере. Поверхность и атмосфера нагревается до определенной температуры, и сама начинает испускать длинноволновую радиацию. Эта радиация перехватывается водяным паром,  $\text{CO}_2$  и озоном, и к этому потоку добавляется излучение, которое формируется в самом слое.  $\text{CO}_2$  поглощает радиацию, идущую от нижних слоев атмосферы, и дает излучение, близкое к внешней границе атмосферы, при температуре тропосферы. Если в атмосфере увеличивается содержание  $\text{CO}_2$ , то окно прозрачности начинает перекрываться, значит, Земля отдает в космос меньше радиации, чем она отдавала раньше. Это означает, что остается энергия, которая должна идти на потепление. С этим эффектом связано антропогенно происходящее глобальное потепление.

## Лекция 5

Впервые о том, что непогоду несут атмосферные фронты, задумались в 1917 году, во время Первой мировой войны. Первые рисунки линий непогоды (их тогда ещё не называли фронтами) удивительно совпадали с линиями перемещений войск. Еще один «военный» термин в метеорологии – тыловая часть циклона. С тех пор прошло уже более 100 лет; от карты погоды военного практически ничего не осталось, но даже сейчас военные карты в некоторых метеорологических службах делаются не автоматически, а вручную.

Прогнозы погоды имеют определенную точность. На завтрашний день точность составляет 96%, а на неделю – 77%. Если вы будете предсказывать на завтра каждый день, зная сегодняшнюю погоду, то такой прогноз называется **инерционный**. В районе европейской территории России успешность такого ежедневного прогноза будет порядка 73%.

### **Светимость Солнца и солнечная активность. Солнечная постоянная.**

Наша звезда в классификации звёзд называется жёлтый карлик. Человек излучает инфракрасную радиацию, но мы не можем видеть ее глазами. К инфракрасному излучению наиболее близок красный цвет, а к ультрафиолетовому – фиолетовый. Солнце является главным и единственным источником тепла для поверхности Земли. Земля вращается вокруг Солнца по эллиптической орбите и получает в каждый момент времени разное количество солнечного тепла. **Солнечная постоянная** – это среднее количество солнечного излучения, которое приходит на перпендикулярную поверхность, и она равняется  $1361 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  для Земли. Это значит, что плотность потока на каждый квадратный метр чуть больше киловатта. Однако солнечная постоянная никогда не бывает так постоянной, как людям на Земле того бы хотелось. Колебания солнечной постоянной приводят к достаточно заметным изменениям глобального климата планеты. Чередования относительно тёплых и относительно прохладных планетарных периодов связано с изменениями солнечной постоянной. За 25 лет происходили изменения солнечной постоянной на доли процента, но колебания на несколько Ватт меняют климат планеты на относительно более холодные и относительно более тёплые периоды. Например, в двадцатых-тридцатых годах прошлого века люди успешно осваивали Арктику в том числе за счёт относительно высокого значения солнечной постоянной. Климат относительно потеплел по всей планете, и доселе недостижимые территории стали внезапно достаточно доступны. В 2019 году мы находимся в периоде с наиболее низким значением солнечной постоянной, а 2017 и 2018 годы были одними из самых теплых за последние 150 лет. Это является одним из доводов к тому, что текущее глобальное потепление является небывало быстрым. За потеплением Арктики наступил минимум 1940-1960-х годов, который был вызван как раз уменьшением значения солнечной постоянной. В 2019 воздушная оболочка стала настолько разогретой, что уже не очень хорошо реагирует на

изменение солнечной постоянной, как это происходило в минувшие периоды потепления.

Для всех планет Солнечной системы солнечная постоянная разная.

$$I_l = I_0 \left(\frac{a}{l}\right)^2$$

Эта формула показывает изменение значения солнечной постоянной для планет. Например, Марс расположен практически в полтора раза дальше от Солнца, чем Земля, то солнечная постоянная для Марса была бы гораздо ниже, всего  $588 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Связана относительно холодная «погода» на Марсе. Основные атмосферные явления – это пыльные бури, которые можно приравнять к погодным явлениям, но синоптики на Марсе не происходят в том числе потому, что атмосфера на этой планете гораздо более разреженная.

В среднем на единицу площади земного шара поступает одна четверть от солнечной постоянной. Это связано с тем, что Солнце в каждый момент времени греет только определенную часть планеты.

Солнце чрезвычайно динамично, и за счет этого в нём наблюдаются разные по площади и по времени возмущения. Самые распространённые из них — это пятна на Солнце. Их наблюдали ещё в античное время, и отсюда следует известное изречение о том, что даже на Солнце бывают пятна, то есть что даже самый великий человек не лишён недостатков. Динамику изменения количества солнечных пятен мы можем проследить с 1700 года. Текущий период характеризуется увеличением солнечной активности, что сказывается на солнечной постоянной, причём солнечная постоянная становится больше, когда на Солнце больше пятен. Увеличение солнечной активности и увеличение количества солнечных пятен влияет на появление таких солнечных артефактов, как и внезапные вспышки, которые увеличивают количество солнечного тепла, приходящего к нашей планете. На других звёздах можно увидеть ещё большую динамику. Циклоны и антициклоны существуют в атмосферах в других планет, например, Юпитера, Сатурна, Венеры; динамика этих вихрей в атмосферах планет земной группы тоже связана с солнечными пятнами. Солнечную активность пытались коррелировать с активностью социальной. Если посмотреть труды философов, в том числе эпохи Возрождения и XIX века, то во многих из них будет отмечаться интересная подробность: количество солнечных пятен неплохо коррелировала с изменениями в социальной структуре населения Земли. Определённым образом количество пятен пытались коррелировать с количеством военных конфликтов и находили, как тогда казалось, интересные связи, поэтому появление новых солнечных пятен всегда пугало людей. Сейчас мы видим, что определённое влияние солнечных пятен на климат существует, но в определённые периоды некоторые связи, не имеющие статистической значимости, могли вводить в заблуждение естествоиспытателей прошлого.

## **Солнечная радиация (инсоляция) на ВГА. Сезонность. Зональность и сезонность как важнейшие факторы географической среды.**

Существуют модели земной системы, которые воспроизводят количество солнечного тепла, падающего на определенную территорию, например, на Тихий океан 1 января 1948 года. В 00:00 по Гринвичу максимум солнечного тепла приходился не на район экватора, а на район, близкий к Южному тропику. Каждый раз Солнце освещает интенсивным образом только небольшую территорию, которая соотносится к общей площади Земли достаточно скромным образом, и именно здесь создается максимум. За счёт этого возникают многие наблюдаемые циркуляционные явления. Пятно будет двигаться в течение дня от восточных меридианов к западным. Над Северным тропиком оно будет летом северного полушария, а над экватором - в дни равноденствий.

Мощность различных источников энергии на горизонтальную площадку может различаться на Земле. Например, в Исландии геотермальный поток местами может быть сильнее, чем солнечный, но в среднем для Земли это не так.  $240 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  приходит к нам от Солнца. Энергия потока солнечной радиации, отражённой от полной Луны, меньше солнечного в 10 000 раз, а геотермальный меньше в 2 000 раз.

Существует формула, по которой можно рассчитать **значение солнечной постоянной**.

$$I'_0 = I_0 \left(\frac{a}{l}\right)^2 \sin h = I_0 \left(\frac{a}{l}\right)^2 \left(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos\left(\frac{2\pi\zeta}{\tau}\right)\right)$$

Параметры земной орбиты неодинаковы. Солнце находится ближе всего к Земле в январе. Зональность попадания солнечного тепла на Землю рождает практически всю ту климатологию, которую мы с вами знаем, видим и к которой привыкли. Зональное распределение инсоляции определяет зональность поля температуры, из-за чего формируется вся планетарная циркуляция атмосферы. В климатологии как в расчетной науке развивались климатические модели. Процессоры смартфонов тестировались на решении именно климатических задач. Когда климатическая модель была впервые реализована, то Землю «остановили» и «запустили» на ней неоднородность солнечного нагрева, и вся циркуляция была воспроизведена. Благодаря моделям оказалось, что озоновый слой очень пластичен. Созданные в озоновом слое дыры затягиваются за день или за двое суток.

Если рассчитать равновесную температуру на Земле, используя уравнение Стефана-Больцмана, то среднее значение температуры будет 255 К или -18°C. Но реальная средняя температура в приповерхностном слое Земли будет 14°C, то есть разница составляет 32 градусов – это влияние парникового эффекта. Без наличия атмосферы жизнь той форме, в которой мы её наблюдаем, была бы невозможной. Сейчас существуют глобальные космические инженерные проекты, которые предусматривают возможности борьбы с естественными проблемами, возникающими в космической

сфере, например, постепенным ослабеванием светимости Солнца. То, что помогает сейчас существовать нашей цивилизации, и есть парниковый эффект, без которого жизнь на Земле в белковом виде была бы невозможной.

### **Солнечная радиация в атмосфере: суммарная радиация.**

Вернемся к физическим свойствам солнечного спектра. В закатном положении и в зените Солнце находится на разной высоте, с чем связано изменение количества излучения. Проходимый солнечным лучом путь больше на закате, а в атмосфере как в неидеальной среде происходит рассеивание. Максимум в солнечном спектре излучения приходится на жёлто-зелёный цвет, и поэтому мы видим Солнце желтым. С увеличением количества пути, проходимого солнечными лучами, рассеяние различных спектров увеличивается, и на длинном расстоянии остаются только самые длинные из видимых волн, которые мы видим красными. В периоды выброса вулканической пыли, в сильно загрязнённых атмосферах промышленных китайских городов, в Москве и России при забросах сахарского песка можно увидеть необычайно красные закаты. В 20 веке самые красивые закаты наблюдались после падения Тунгусского метеорита. После самого мощного взрыва вулкана Тамбора в 1815 году многие пейзажисты проводили целые вечера, пытаясь поймать совершенно необычные краски, которые подарил мировой атмосфере самый большой выброс вулканической пыли. По закону Бэра-Буге-Ламберта даже при угле 30 градусов над поверхностью Солнца путь, проходимый лучами в атмосфере, ровно в 2 раза больше, чем распространение лучей из зенитной точки. Именно за счет этого мы наблюдаем такие потрясающие тона закатного Солнца.

В результате преобразований солнечной радиации на поверхность, удаленную от Земли на 2 метра, от Солнца будет приходить **прямая радиация(S)**. В ходе своего рассеяния от аэрозолей и облаков будет приходить **рассеянная радиация(D)**. Рассеянная радиация измеряется всегда приходящей от верхней полусферы, поскольку она не приходит от диска Солнца. Прямая радиация приходит от Солнца, и показателем ее наличия являются тени. Так как нам нужна прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность, то мы всегда умножаем её на синус угла. Если угол Солнца равен 0 градусов, то прямой радиации практически нет. Если Солнце находится в зените, синус угла 90 градусов равняется единице. Обе радиации вместе называются **суммарной радиацией(Q)**, потому что это сумма прямой и рассеянной. Если бы вся радиация приходила к нам и абсолютно вся отражалась, то наш мир был бы зеркальным. Все многообразие цветовых оттенков, которое видит наш глаз, создается благодаря эффекту отражения и благодаря тому, что помимо прямой и рассеянной радиации существует ещё и **отраженная(R)**. Здесь появляется хорошо знакомое еще со школы понятие **альбедо** земной поверхности. Многообразие цветовых оттенков, доступных глазу, в том числе связано с коротковолновым альбедо земной поверхности. Альбедо свежеснежного снега 97%, чернозема - от 3 до 5%, 20-25% – у зеленой травы, около 60% – у песчаной пустыни, альбедо тундры около 20%. Вода является



единственным, возможно, из распространенных видов естественной поверхности, альбедо которого зависит сразу от двух факторов. Первый фактор — это высота Солнца над горизонтом, а второй — это уровень волнения. При высоком волнении отражаемость очень высокая. За счёт зеркальности, создаваемой волнами, в данном случае альбедо повышается до 70-80%. У воды, на которую Солнце светит в зените и у которой водная гладь абсолютно не подвержена волнению, альбедо опускается до 5-10%, то есть сильно меняется.

## Лекция 6

23 сентября 2019 года Россия объявила о своем присоединении к Парижскому климатическому соглашению 2015 года. Текст соглашения не содержит численных обязательств по сокращению выбросов. Парижское соглашение — это не прямой наследник Киотского протокола. Между ними был еще непринятый Копенгагенский протокол, который был доработан и принят в Париже в 2015 году. Киотский протокол только робко намекал на сокращение выбросов, тогда как Парижское соглашение говорит нам прямо, что их необходимо сокращать. Присоединяясь к соглашению, страны лишь соглашаются прилагать усилия для сдерживания роста глобальной средней температуры в пределах двух градусов от доиндустриального уровня, то есть от средней температуры земного шара приблизительно на конец XIX века, и стараться достичь цели полтора градуса, а также разработать долгосрочные стратегии низкоуглеродного развития. Например, авиакомпании, поддерживающие Парижское соглашение, могут увеличить цену билета из-за снижения углеродного следа. Целью соглашения является активизировать осуществление Рамочной конвенции ООН по изменению климата и удерживать рост глобальной средней температуры намного ниже 2 °C и приложить усилия для ограничения роста температуры величиной 1,5 °C. Однако даже если прямо сейчас вернуться низкоуглеродной экономике, то это после этого и содержание углекислоты, и температура некоторое время продолжат расти. Участники соглашения объявили, что пик эмиссии должен быть достигнут настолько скоро, насколько это окажется возможным. Это означает, что если мы снизим выбросы сегодня, то самое негативное воздействие произойдет гораздо раньше, и к нему будут готовы. Страны-участники определяют свои вклады в достижение декларированной общей цели в индивидуальном порядке и пересматривают их раз в 5 лет, то есть следующий пересмотр российского вклада в мировые выбросы будет произведен не раньше 2024 года. Стратегия на настоящий момент существует, но она неконкретно прописана. На данный момент из ведущих стран из Парижского соглашения вышли Соединённые Штаты, но процесс выхода тоже не быстрый, и от всех обязанностей Парижского соглашения Соединённые Штаты Америки освободятся через четыре года после выхода.

Перейдем к вопросу солнечной радиации. Она разделяется на рассеянную и прямую, которые дают вместе суммарную и относятся к коротковолновой радиации. Как мы сами убедились на прошлой лекции, солнечная радиация — это самый главный источник тепла для нашей планеты. Неоднородность ее поступления на земную поверхность и определяет возникновение атмосферной циркуляции. Если остановить Землю, а после завертеть её снова, то все ветры, муссоны, пассаты установятся абсолютно таким же образом, который мы можем обнаружить на нашей планете сейчас. Однако в ряде физико-математических моделей, например, распреснении Северной Атлантики из-за остановки Гольфстрима и таяния ледникового щита, Гольфстрим обратно не восстановился. На его восстановление в среднем ушло порядка

нескольких лет, и когда пресная вода распределилась по земному шару, то Гольфстрим возник снова, но некоторые механизмы показали, что Гольфстрим не восстановился в принципе. Когда мы говорим о геоинжиниринге, то можно вспомнить конец XIX века, когда появился проект зеркал на Луне для избавления от уличного освещения. Однако даже если их можно было установить, то убрать уже невозможно. Этот пример говорит о том, что отдельные процессы могут не иметь обратного хода.

Методы борьбы с глобальным потеплением известны приблизительно с шестидесятых годов прошлого века. Для этого в атмосферу на определённых высотах необходимо нагнетать  $SO_2$ , который помогает бороться с глобальным потеплением. Но если однажды запустить этот механизм, то остановиться уже будет нельзя. Нельзя попробовать добавить немного сернистого газа, а потом это завершить. Когда в определённый момент появится недостаток сернистого газа, это будет ощущаться климатической системой. Произойдет лавинообразный скачок на несколько градусов в течение одного-двух лет, и есть мнение, что современная цивилизация в принципе не готова его выдержать. Во-первых, это создаст циркуляционные проблемы: увеличение количества опасных тропических циклонов, тайфунов, ураганных ветров и экстремального количества осадков. Также возникнет необходимость бороться с так называемыми волнами тепла. Если человек, рождённый, как минимум, в умеренных широтах, в течение недели будет ощущать на себе термический пресс, то это отразится на состоянии его сердечно-сосудистой системы.

### **Уравнение радиационного баланса.**

Коротковолновая радиация приходит к нам от солнечного диска, и она практически не нагревает атмосферу. Нагревается земная поверхность, и от неё уже длинноволновым образом нагревается атмосфера. Идеальная модель Земли и атмосферы — это человек, который укрывается одеялом. Если бы этого атмосферного «одеяла» и парникового эффекта не было бы, то разность между текущей температурой воздуха у поверхности Земли, которая составляет  $+15^\circ C$ , и той, которая восстановилась бы в результате исключительно лучистого равновесия при взаимодействии альбедо с коротковолновой радиацией, была бы 29 градусов. В спокойных антициклональных условиях процесс нагрева земной поверхности влияет на её температуру, и если бы циркуляции не существовало, то, зная радиационный баланс поверхности, мы могли бы предсказывать погоду на завтра.

**Прямая солнечная радиация (S)**, которая всегда приходит на перпендикулярную лучам поверхность, ослабляется от угла падения солнечных лучей, поэтому мы всегда считаем солнечную радиацию как функцию угла падения ( $S' = S \cdot \sin \alpha$ ). Максимальное значение прямой солнечной радиации будет, когда Солнце находится в зените и синус угла будет равен единице, а минимальное - когда солнечный диск будет располагаться приблизительно на нулевой высоте. Но идеальной картины не возникает, так как атмосфера непрозрачна. В ней есть аэрозоли, ядра конденсации и, наконец, облачность.

Каждый элемент рассеивания в облаке (это может быть и частичка сажи, и ядро конденсации, на котором образуются дождевые капли, это могут быть самим дождевые капли или градины в кучево-дождевом облаке) благоприятствует тому, что солнечная радиация рассеивается, и небольшие ошметки от радиации приходят со всей верхней полусферы. Самый простой способ определить в полевых условиях, есть ли прямая радиация или нет, — это наличие тени от предметов. Если бы вся солнечная радиация поглощалась земной поверхностью и не отражалась от неё, то мы видели бы мир абсолютно черным, а, скорее всего, не видели бы его в принципе. Существует альbedo любых предметов поверхностей, которое возникает из-за потока отражённой солнечной радиации, направленной наверх. Однако есть наличие радиации в других длинах волн, а именно длинноволновой тепловой радиации. Длинноволновая радиация формируется из-за того, что альbedo не равно 100%. Земная поверхность нагревается и начинает излучать в совсем другом диапазоне. Например, в жаркий солнечный день от асфальтированной мостовой ощутимы теплые волны, которые приходят от асфальта, то есть поток **исходящей длинноволновой радиации** ( $E_3$ ). Рассчитать ее можно, используя уравнение Стефана-Больцмана ( $E_3 = \delta \cdot \sigma \cdot T^4$ ), в котором показано, что интенсивность излучения определяется всего лишь одним метеорологическим параметром: температурой поверхности. Чем выше температура поверхности, тем лучше она излучает. По этой формуле излучает практически любая поверхность, нагретая выше абсолютного нуля. Однако мы не ощущаем длинноволновой радиации, исходящей, например, от столов и стульев, так как мы сами теплее этих предметов, а передача энергии в физике происходит от более нагретого тела к более прохладному. Если бы этого не происходило, то мы могли бы делать совершенно потрясающие вещи: поставить чайник на плиту комнатной температуры, и чайник бы закипел, а плита покрылась бы инеем. Таким образом, мы можем в любой момент времени приблизительно понимать, какое длинноволновое излучение дает абсолютно любой предмет, одушевлённый или неодушевлённый. Сверху приходит коротковолновая радиация, а наверх уходит длинноволновая, но облачность переизлучает это тепло. Нагретые капельки воды в облаках начинают опять излучать во все стороны, кое-что из этого переизлучается обратно. **Возвращающаяся длинноволновая радиация** ( $E_a$ ) - встречное длинноволновое излучение атмосферы. Например, на улице прохладной летней ночью становится резко холодно, потому что все тепло ушло наверх. Если выйти на улицу облачной ночью, то температура довольно комфортная из-за того, что радиация продолжает согревать Землю, работая как одеяло для человека. Также существует **эффективное излучение земной поверхности**  $E_{эфф} = E_3 - E_a$ . Теперь сложим все радиационные притоки и вычтем из них все отрицательные члены данного уравнения.

$$B = S' + D - R + E_a - E_3$$

$$B = Q - R - E_{эфф}$$

$$B = Q(1 - A) - E_{\text{эфф}}$$

Это и есть **уравнение радиационного баланса** земной поверхности. Это энергетическое выражение разницы коротковолнового прихода и длинноволнового излучения, уходящего от Земли. В среднем радиационный баланс практически всей земной поверхности за год, за исключением Антарктиды и Гренландии, является положительным. Это означает, что почти все части земного шара и все континенты, за исключением острова Гренландия и самого южного континента, получают тепла больше, нежели отдают обратно.

Солнечная радиация влияет на наше здоровье. Ультрафиолет, чрезвычайно полезный в бактериологическом смысле, в больших дозах не просто вреден, а убийственен. Кроме синтеза витамина D могут возникнуть заболевания кожи, а также раковые заболевания, заболевания глаз и ослабление иммунной системы. Статистика по заболеванию раком кожи неодинакова на территории земного шара. Она являет собой всего 0,5 единиц на десять тысяч в самых безопасных с точки зрения рака кожи регионах - Китае, Корее, Японии, Вьетнам, Таиланд и Пакистана. Это связано не столько с малым количеством ультрафиолетовой радиации, которая проходит через облачные структуры, но и с устойчивостью местного населения. В Европе, где мы проживаем, процент заболеваемости в разы выше практически в 30 раз, что связано с неустойчивостью населения, особенно в Северной Европе, к ультрафиолетовому излучению. Опаснее всего на юге - в Австралии и Новой Зеландии - в 80 раз выше, чем в Юго-Восточной Азии. Именно там опаснее всего, так как озоновая дыра ближе всего подходит к населенным регионам в весеннее время.

Географическое распределение отношения пришедшей коротковолновой и отраженной радиации неодинаково по всему земному шару. Разность приходящей и отраженной солнечной радиации максимальна у западного побережья Северной Америки, западного побережья Австралии, а также в районах, в которых обычно преобладают антициклоны. Меньше всего эта разница в районе Гвинейского залива, на севере и на юге, а также в районах Амазонии. Максимум разницы близок к трем сотням, минимум - около 50 в полярных широтах. Это создает неоднородность нагревания, которая приводит к возникновению не только атмосферной, но и океанической циркуляции. Максимум отражённой солнечной радиации, которая приходит до верхней границы атмосферы, достаётся наиболее облачным регионам: Амазонии, Гвинейскому заливу и муссонным областям.

Явление зелёного луча иногда может быть видно при погружении солнечного диска за горизонт (в идеальном виде за морскую или океаническую поверхность). Этот луч именно зелёный, а не красный, хотя должен быть таковым исходя из рассеяния коротковолновой радиации или, наоборот, фиолетовым из-за дифракции. Когда Солнце

находится низко над территорией горизонта, то возникает разница в рассеянии не только в пределах небосвода, но и в пределах одного солнечного диска. Самые низкие области уходят в красный цвет, поскольку остаются одни длинные волны, а верхние области диска должны оставаться в наиболее коротковолновом спектре, то есть в идеальной атмосфере они могли бы быть синими и фиолетовыми. При идеально прозрачной атмосфере есть явление синего луча. Однако наш глаз устроен таким образом, что синие и фиолетовые оттенки он воспринимает в принципе хуже, поэтому явление зеленого луча приходится на зелёный спектр.

### **Радиационный бюджет на ВГА и перенос энергии.**

Баланс длинноволновой радиации у земной поверхности – это эффективная радиация, но с обратным знаком. Длинноволновый баланс в среднем всегда отрицателен. Действительно, от Земли уходит куда больше тепла, чем приходит от атмосферы. Больше всего тепла теряют пустынные регионы Сахары, Саудовской Аравии, пустыни рядом с Долиной Смерти, австралийские пустыни, пустыня Намиб. Это происходит потому, что ночью в пустыне температура за счёт ухода длинноволновой радиации от поверхности может опускаться до отрицательных температур. На верхней границе атмосферы вы также обнаружите, что уходящая длинноволновая радиация максимальна в тропических районах и минимальна в умеренных и полярных широтах, то есть между широтами существует неоднородность в поглощении и отдаче энергии. Формально верхней границей атмосферы является тот уровень, на котором молекулы уже свободно переходят из космического пространства в околоземное, то есть там, где сила тяжести уже не может их удержать. В радиационном плане верхней границей атмосферы можно считать величину порядка 50-80 км, потому что выше в атмосфере уже практически не находятся ни водяной пар, ни ядра конденсации, то есть нет всего того, что может влиять на радиационный баланс. Исходя из этого и формируется разница максимального значения **радиационного бюджета** - разница между приходящей и уходящей радиацией. Они наблюдаются в зонах экваториального климата по Б.П. Алисову, то есть больше всего в районе морского континента Индонезия, где чрезвычайно хорошо разогревается тропический океан. Это происходит именно в районе Индонезии, а не над экваториальной Африкой, из-за того, альбедо воды гораздо ниже, и возможность принимать солнечное излучение у морского континента вокруг Индонезии и у Индийского океана гораздо выше, чем у пустынь тропического пояса. В пустынных районах Сахары и Саудовской Аравии радиационный бюджет будет отрицательным, в отличие от находящихся на той же широте Мексиканского залива, северной Мексики и юга Соединенных Штатов Америки. Больше всего тепла получают экваториальные районы Мирового океана, как Тихого, так и Индийского. Локальные максимумы есть и в районе востока Южной Америки, минимумы – пустыни. В условиях крутящейся Земли это приводит к перераспределению тепла. Поскольку в условиях атмосферы Земли как планеты баланс всегда замыкается, то просто необходимо организовать механизм, который

перераспределяет тепло по земному шару, и только океаническая циркуляция с этим не справляется. Разности не только температур, но и солёности является причиной возникновения океанических течений. Создаётся чрезвычайно сложный конгломерат океанической и атмосферной циркуляции, которые неидеально сочетаются друг с другом. Явление Эль-Ниньо нарушает установившуюся связь и рушит характер циркуляции в тропических широтах в годы, в которые наблюдается максимум этого колебания.

В связи с тем, что запускается не только океан, но и атмосфера, успехи в моделировании климата и погоды были достигнуты не сразу после того, как появились мощные суперкомпьютеры. Около 20 лет ушло на то, чтобы восстановить физические связи обмена теплом и импульсом. Циркуляция всегда несет с собой ветровой импульс, и оценка его очень важна. Например, неправильная установка полей ветровых электростанций в Китае повлекла за собой ухудшение качества воздуха в Пекине. Тот ветер, который до этого был достаточен для того, чтобы раздувать атмосферные примеси в и без того загрязнённой столице Китая, полностью ушел на то, чтобы крутить лопасти ветровых генераторов к северо-востоку от Пекина. Ветровая энергетика возобновляемая, но она не бесконечная. После распада Советского Союза, который обладал очень серьёзными достижениями в области воздействия на атмосферу, в девяностые технологии по сжегиванию осадков распространялись по всему земному шару до тех пор, пока не возник прецедент. Одна из стран засушливого пояса обратилась в международный суд с обвинением в адрес соседней страны, что все осадки, небольшое количество которых было предназначено климатической циркуляцией для сельскохозяйственных регионов страны, были путём атмосферных технологий искусственно сжежены на территории страны-ответчика. Суд в итоге присудил компенсировать все убытки второй страной. Разработки климатического оружия являются примером наиболее убыточных стратегий, которые предпринимались в XX веке, потому что построенный на Аляске излучатель Харп, основное назначение которого было воздействовать на верхние слои атмосферы с целью изменения атмосферной циркуляции, скорее всего не заработал.

Межширотный перенос энергии в атмосфере и в океанах имеет свои минимумы и максимумы. В атмосфере перенос энергии через круг широты примерно в два раза больше, чем в океане. Теплоёмкость океана больше, чем у атмосферы, а перенос энергии в атмосфере в два раза сильнее, поэтому для прогноза погоды в основном применяются прогностические модели атмосферы. Для того, чтобы прогнозировать климат, применяются прогностические климатические модели системы океан-атмосфера. Разницу, которая достаточна велика в абсолютном масштабе, потому что этого ватты на квадратный метр, помогает сблизить единственный механизм передачи энергии между низкими и высокими широтами – циклоны. Если бы не было циклонов, то тропические области были бы гораздо более жаркими, а умеренные - гораздо более прохладными. Именно благодаря циклонам радиация, приходящая и поглощающаяся

земной поверхностью и океаном, распределяется на земном шаре тем образом, который мы видим. Взаимодействие гидросферы с атмосферой создает перенос и круговорот тепла и влаги, которые изучают отдельно метеорология, океанология и гидрология.



# Лекция 7

## Вода в атмосфере.

С тех пор, когда на нашей планете появились три фазы воды, идёт постоянный **влагооборот** - обмен воды между земной поверхностью и атмосферой. Если сузить Землю какого-нибудь небольшого района Москвы, то в нём всё равно будет наблюдаться незамкнутый влагооборот. Одно из наиболее популярных объяснений влагооборота на ограниченной территории — это экосистема Аральского моря, которая была повреждена изъятием воды для орошений хлопковых земель. В определённые моменты там наблюдался вполне устойчивый локальный влагооборот, когда вода испарялась с Аральского моря, относилась на отроги гор и потом возвращалась оттуда в виде воды, выпадающей из атмосферы.

Больше всего воды находится в Мировом океане, гораздо меньше - в подземных водах и подземном стоке и достаточно немного содержится постоянно в атмосфере. Содержание воды в атмосфере невелико, но процессы перекачивания влаги через атмосферу через испарение и выпадение осадков практически в 20 раз больше, чем постоянное содержание в облачности.

Влагооборот складывается из трех основных процессов: **испарения, конденсации и выпадения осадков**. Замкнутый влагооборот существует только на всей планете Земля, потому что влаге больше некуда деться. Остатков влаги, которые осаждаются и замерзают в поверхностных ледниках и таким образом изымаются из влагооборота, во-первых, немного, а во-вторых, они возвращаются с таянием ледников и откалыванием айсбергов. Тая, айсберги повышают уровень Мирового океана. За XX век уровень повысился приблизительно на 20-25 см. Сейчас это повышение идёт в среднем где-то на 2-3 мм в год. Возраст самых старых ледников не сравним с возрастом наличия постоянного влагооборота на Земле.

Испарение складывается из достаточно простых слагаемых. Это непосредственно само испарение и испарение воды растениями, или транспирация, когда растение своими корнями впитывает влагу из почвы и испарением с листьев отдает ее обратно. Эти два источника всё время порождают испарение влаги с поверхности, и она накапливается в атмосфере. В атмосфере вода содержится всегда только в трех состояниях – газообразном (водяной пар), капельно-жидком и твердом (кристаллы льда).

**Влажность воздуха** – это содержание водяного пара в воздухе. Водяной пар как газ давит на все остальные газы, которые находятся в составе атмосферы. Основные газы — это азот, кислород, аргон, и только потом в составе следует углекислый газ.

Несмотря на то, что углекислого газа очень мало, усиление парникового эффекта связано с увеличением содержания углекислоты всего лишь на одну сотую процента. Когда-то содержание углекислого газа в атмосфере было 0.03%, а по новым данным уже 0,04%.

В состоянии насыщения в воздухе всегда находится максимальное для данных условий количество водяного пара. Кривая насыщения (сатурации) показывает предельно возможное содержание водяного пара для каждого значения температуры. Состояние насыщения неоднозначно при отрицательных температурах: существует две разных кривых - для жидкой воды и для льда.

### **Закон Дальтона.**

**Скорость испарения** описывается **законом Дальтона** и выражается в миллиметрах слоя воды, испарившейся за единицу времени с данной поверхности. Она зависит от температуры испаряющей поверхности, дефицита влаги, скорости ветра, потому что при разных скоростях ветра испарение будет идти неодинаково. Например, если повесить сушиться бельё на хорошо продуваемой площадке, то оно высохнет за пару часов, а если повесить при полном штиле, то на это уйдет гораздо больше времени. Также на скорость испарения влияют свойства испаряющейся жидкости и атмосферное давление.

Существует два показателя испарения. Первый – это **фактическое испарение**, то есть количество водяного пара, который испарился с поверхности. Вторым - **испаряемость** - максимально возможное испарение в данных условиях, не ограниченное запасами влаги. Испарение равно испаряемости над океанами. Во всех остальных случаях эти показатели различаются. В самом влажном месте на Земле, Черепунджи, в год выпадает около 12 000 мм осадков, а среднегодовые значения испарения составляют около 2 000 - 2 500 мм.

Испаряемость максимальна в пустынных регионах, откуда могло бы испариться много. Именно поэтому максимум испаряемости приходится на Сахару, аравийские пустыни и центральную и северо-западную части Австралии. Меньше всего в бореальных районах, потому что там прохладнее. На территории России значения испаряемости в среднем невелики. На черноморском побережье они составляют около 1000 мм, а ближе к арктической зоне - менее 100 мм. Именно с этим связано то, что тундра практически всегда заболочена. Несмотря на то что осадков немного, испаряемость ещё меньше, поэтому там всегда избыток влаги. В полярных широтах испаряемость на суше примерно равна испарению. В Западной Сибири испаряемость чуть больше испарения, а в тропиках, в пустыне Сахара, испаряемость больше испарения в 30 раз. На экваторе испарение и испаряемость примерно равны.

При **дефиците увлажнения** небольшое фактическое испарение при высоких температурах приводит к образованию пустынных ландшафтов. **Переувлажнение**, как, например, в тундрах, приводит к существованию обводненных территорий. В таких ландшафтах много озёр, из которых очень часто высвобождается метан. Многолетняя мерзлота подтаивает, и образуются пузырьки метана.

### Характеристики влажности воздуха.

**Парциальное давление водяного пара,  $e$**  – давление (в гектопаскалях), с которым водяной пар давит на все остальные газы. Оно имеет значение ниже 10 в полярных широтах и около 30 в экваториальных.

**Давление насыщения,  $E$  (гПа)** – давление, которое максимально возможно при данной температуре. Отношение парциального давления к давлению насыщения – это **относительная влажность воздуха** ( $f = \frac{e}{E} \cdot 100\%$ ). Она традиционно измеряется в процентах. 100% — это абсолютно насыщенный воздух, 0% - абсолютно сухой. Если лучаев с абсолютно сухим воздухом на планете достаточно немного, то стопроцентная влажность — это любые экваториальные и муссонные широты. Человеку некомфортно при стопроцентной влажности, а при пребывании в абсолютно сухом воздухе начинается обезвоживание. В среднем в российских городах зимой при работающем центральном отоплении относительная влажность может опускаться ниже 20%. Из этого следуют проблемы с качеством кожи, высыхание слизистой горла, поэтому иногда необходимо использовать увлажнители, так как комфортные границы относительной влажности для организма составляют от 30 до 70%. При высоких значениях относительной влажности человек начинает сильно потеть, а при низких сохнут кожные покровы.

Кроме относительной влажности существует **абсолютная**. Она измеряется в килограммах на метр кубический. Это количество килограммов осажденной воды, которые находятся в кубическом метре воздуха.

**Удельная влажность** — это отношение непосредственно давления водяного пара к давлению воздуха.

**Температура точки росы** — это температура воздуха, при которой начинается конденсация и при которой в обычных условиях выпадает роса. Если влаги в воздухе немного, а температура высокая (порядка 25 градусов), влажность порядка 30-40%, то температура точки росы будет примерно 10-12 градусов.

**Дефицит влажности** – это разница между давлением насыщения и парциальным давлением водяного пара.

**Дефицит точки росы** — это разница между текущей температурой и той, при которой влажность достигнет 100%.

Абсолютная влажность характеризует содержание водяного пара в воздухе. При одинаковых значениях абсолютной влажности могут достигаться абсолютно разные картинки. Влага мало и в полярных условиях, и в пустынях, но ландшафты абсолютно разные, потому что у них разная относительная влажность. Чем теплее, тем относительная влажность меньше, а парциальное давление водяного пара, наоборот, больше. Во Владивостоке, который близок к муссонному климату, максимум

относительной влажности воздуха приходится на вторую половину лета. В Москве зимой отмечаются наиболее высокие значения относительной влажности. В Якутске минимум достигается в весенние месяцы, а максимум – осенью.

В России максимальные значения относительной влажности достигаются в январе на северо-западе (в районе Мурманска – 85%). В июле влажность ниже в южных регионах и остаётся местами высокой в областях, близких к арктическому побережью. Зимой значений относительной влажности более 90% практически нет, кроме моря Лаптевых, где находится самая большая незамерзающая полынья в России. Летом высокая влажность может приближаться к 100% на Крайнем Севере и также в районе Сочи. История образования Сочи как всероссийского, ещё в Российской империи, курорта чётко связана с наличием высокой относительной влажности. До того, как там была проведена мелиоративная работа, в том числе высадка эвкалиптов, малярийные комары плодились в большом количестве водных объектов, отравляя людям жизнь.

### **Конденсация в атмосфере.**

**Конденсация** — это переход воды из газообразного состояния в жидкое. Конденсация начинается при достижении воздуха насыщения, то есть при понижении температуры и поднятии воздуха. Тёплый пузырь воздуха поднимается вверх под действием термодинамических сил плавучести и начинает там охлаждаться. В нём начинается процесс конденсации.

Есть **три механизма** подъёма воздуха:

- 1) при турбулентном движении, когда происходит хаотическая турбулентность;
- 2) на атмосферных фронтах;
- 3) в гребнях атмосферных волн.

Помимо конденсации происходит **сублимация** - образование кристаллов и переход водяного пара в твердое состояние, минуя жидкую фазу. Сублимация обычно происходит при очень низких температурах, обычно ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Есть определённый вид осадков, который называется ледяные иглы. В Москве их можно видеть при более высоких температурах, примерно при  $-30^{\circ}\text{C}$ , когда вы видите необычные блёстки в воздухе, которые ещё и неуловимым образом легко осаждаются. Из-за ледяных игл возникают световые столбы в полярных областях, когда свет от фонаря уходит практически в космическое пространство в районе горизонта. Образование световых столбов происходит при температуре ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  в том числе как раз в результате сублимации.

Когда скопление продуктов конденсации происходит у земной поверхности, мы называем это **туманом**. Туман является явлением погоды и отмечается на метеорологических станциях.

При конденсации на поверхности земли образуются роса или иней. В случае высокой влажности воздуха могут возникать гололеды и изморозные отложения. Если мощность гололедно-изморозного отложения достигает более 5 см, то это чрезвычайно опасно для линий электропередач. В России самой подверженной гололедно-изморозным отложениям является Волгоградская область, что связано еще и с большой протяженностью ЛЭП.

Конденсация происходит, когда в воздухе есть **ядра конденсации**. Это частички либо соли, если дело происходит над океаном или над морем, либо аэрозоли, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии, на которых происходит конденсация водяного пара. Ядра конденсации обладают большой гигроскопичностью, что увеличивает устойчивость зародыша капли. Ядра конденсации делятся по размерам. Если удалить из воздуха абсолютно все ядра конденсации, то возникнет явление переувлажненности. Когда влаги много, но она не конденсируется, то относительная влажность может достигать более 100%. В лабораторных экспериментах в кубе воздуха, в который нагнетали водяной пар без конденсации, одновременно удавалось достигать влажности порядка 110%. Потом, когда в эту камеру запускали ядра конденсации, происходила лавинообразная конденсация. Также ядрами конденсации могут быть частички почвы и продукты сгорания или органического распада. В дни после массивного запуска фейерверков, в России обычно после больших государственных праздников, ночью наблюдается как раз тот туман, который сконденсировался на саже.

Самые популярные места для скопления продуктов конденсации в атмосфере (капель и кристаллов), которые мы можем увидеть невооруженным глазом, — это **облака**. Существует более 150 видов облаков. Облака переносятся воздушными течениями, при уменьшении относительной влажности облака испаряются, при укрупнении и утяжелении облачных элементов из них выпадают осадки. Отдельное облако существует очень недолго - от 5 до 15 минут. Облако – это механизм неживой природы, который постоянно образует влагу и в котором возникают характерные атмосферные процессы. Процесс облакообразования происходит в течение долгого времени.

Высота облаков может достигать 20 км, что создает огромные проблемы для авиасообщения. Пассажирскому лайнеру залетать в кучево-дождевые облака запрещено, потому что он может не выдержать перегрузок.

По фазовому состоянию облака делятся на **три класса**: водяные, смешанные и ледяные (кристаллические). В водяных облаках вода присутствует исключительно в водной фазе, в ледяных - только в состоянии льда, а в смешанных - все две или даже три фазы. Самые опасные облака – те, в которых фазы перемешаны, потому что именно они рождают перегрузки. Облака бывают **конвективными**, которые могут развиваться без атмосферного фронта. Чтобы кучевые облака вырастали над какой-либо площадкой в результате сильной конвекции, нужна увлажненная или хорошо испаряющая поверхность. Самая близкая по этим условиям - Центральная Россия. Считается, что в

Калужской области образуются наиболее красивые ячейковые и кучево-дождевые облака.

Помимо конвективных, облака бывают также **слоистообразными**. Слоистые облака образуются на теплом атмосферном фронте и затягивают все небо слоем. Также существуют орографические облака, которые образуются над различными препятствиями, как правило, над высокими горами, и в результате возникает лентичулярная и волнообразная облачность.

### **Классификация облаков.**

Классификацию облаков придумали давно. Люк Ховард в 1803 году написал «Эссе о видоизменениях облаков», в котором он впервые проклассифицировал облака. Гёте посвятил Ховарду цикл стихотворений, каждое из которых представляло собой поэтическую иллюстрацию одной из описанных разновидностей облаков.

Международная классификация облаков включает в себя 10 видов, которые делятся на **верхний, средний и нижний ярусы**. Кроме этого, существуют еще и облака вертикального развития, которые не принадлежат ни к какому из ярусов.

В верхнем ярусе находятся все виды **перистых** облаков. Это непосредственно перистые, или Cirrus, средняя высота которых 7-8 км, перисто-кучевые (Cirrocumulus) и перисто-слоистые (Cirrostratus). Перисто-кучевые и перисто-слоистые находятся на высоте 6-8 км.

В среднем ярусе все облака носят приставку высоко-. Это высококучевые (Alto cumulus) на высоте от 2 до 6 км и высокослоистые (Altostratus) - от трёх до пяти км. В нижнем ярусе находится **слоистые** облака, и каждый тип облаков нижнего яруса носит приставку слоисто-. Это слоисто-кучевые (Stratocumulus), непосредственно слоистые (Stratus) и слоистые дождевые (Nimbostratus). Из них выпадает обложной дождь, который идет несколько часов. Еще два типа облаков — это **облака вертикального развития** с основанием ниже 2 км. Это непосредственно сами кучевые (Cumulus - их еще называют облаками хорошей погоды) и кучево-дождевые (Cumulonimbus), которые несут грозу град в шквалистое усиление ветра.

В перисто-слоистых облаках иногда возникает явление гало, которое можно наблюдать вокруг Солнца или Луны. Оно является одним из предвестников приближения теплого фронта. Перистые когтевидные облака – Cirrus uncinus – похожи на кошачьи когти. Перисто-кучевые облака менее проницаемы для солнечного света, а в перисто-слоистых облаках виден слой облачности. У высококучевых облаков среднего яруса видна зернистость, а у высокослоистых вы видите какую-то слоистость. Слоистые облака в нижнем ярусе могут наблюдаться от верхнего слоя до того момента, когда они опускаются с туманом вниз к поверхности Земли. Иногда горах, когда слоистое облако наползает на гору, то человек попадает непосредственно в облако. Слоисто-дождевые облака - те облака, из которых идет дождь.

У Cumulus и Cumulonimbus есть четыре стадии развития: от плоских кучевых облаков (Cu<sub>hum</sub>) в средние кучевые (Cu<sub>med</sub>), дальше идут Cumulus congestus – мощные кучевые облака, когда облако начинает приобретать свинцовый оттенок, и, наконец, кучево-дождевые – самые мощные с характерной наковальной вершью.

Cirrus tractus — это название для облаков, которые образуются от конденсационного следа самолёта. Altocumulus lenticularis образуются в результате орфографического воздействия над горными хребтами. Смысл в том, что это завихренность, которая возникает при огибании хребта или над отдельными вершинами. Stratocumulus mammatus, или вымеобразные, более характерны для южных регионов, но их также можно наблюдать в средней полосе России. Такие облака сопровождаются порывами ветра и сильным дождём.

Облака, которые не входят в классификацию, а находятся вне тропосферы – это стратосферные и мезосферные облака. **Серебристые** облака образуются в мезосфере на высоте 70 км. Их видно летом только в определенный период ночи, когда солнце находится на определенной высоте под уровнем горизонта (обычно считается, что это - 10°C). **Перламутровые** облака стратосферные. Они так же подсвечиваются солнцем, но являются более редкими, и наблюдать их гораздо сложнее.

### **Облачность.**

**Облачность** – это степень покрытия небесного свода облаками. В наших широтах она выражается в десятых долях покрытия неба от 0 до 10 баллов. Ноль значит, что Солнце светит на синем небе, а десять – когда весь небосвод покрыт облачностью. В европейской традиции отсутствие облачности — это 0 баллов, а полная облачность — это 8 баллов. Это сделано потому, что небесный свод удобно разделить на 8 частей по сторонам горизонта, и тогда получаются не десятые части, а октанты. В Северном полушарии над морем более облачно, в Южном полушарии подобное соотношение сохраняется, но море ещё более облачное, практически 8 баллов в полярных широтах. В тропических широтах средняя облачность составляет от 3 до 6, но над морем она всё равно больше. Среднее значение облачности для всего земного шара – 6 баллов. Самые облачные районы над территорией России – северо-запад, а самые безоблачные — это Якутия и Сибирь.

Явления, вызванные скоплением продуктов конденсации у земной поверхности — это **дымка** и **туман**. Туман — это скопление продуктов конденсации, когда дальность видимости меньше километра и черно-белого предмета не видно. В случае дымки ухудшение дальности видимости есть, но на расстоянии километра виден идеально контрастный ориентир. В тумане дальность видимости от 10 м до километра, в дымке – от километра до 10 км.

## Лекция 8

### Туманы.

**Туман** — это скопление продуктов конденсации капель или кристаллов у земной поверхности, когда за пределами одного километра нельзя различить контрастные объекты. Туманы бывают разного происхождения и характера. Самый простой вид тумана, который вы можете видеть на даче или где-нибудь в сельской местности после захода солнца, — это **радиационный туман**. Под словом «радиационный» имеется в виду радиационное охлаждение, когда земная поверхность теряет тепло путем длинноволнового излучения. В нижних слоях атмосферы становится прохладнее, и находящаяся в них влага начинает моментально конденсироваться. На долю радиационных туманов приходится достаточно большое количество летних туманов на европейской территории России. Бывают более интересные туманы, которые можно наблюдать с ноября в Москве, - **адвективные**. **Адвекция** — это приход более теплого воздуха на холодную подстилающую поверхность. Самые сильные адвективные туманы в Москве и Московской области с дальностью видимости не более 20 м обычно приходят с тропическим морским воздухом со Средиземного моря на покрытую снегом поверхность. Если в новогодние праздники вы видите в прогнозе потепление до +5...+7°C, то скорее всего такая погода будет сопровождаться мощными туманами. Обычно в европейских странах при таких туманах перекрывают движение на дороге. Тёплый тропический воздух, который имеет температуру выше нуля и даже местами выше +5°C, приходя на заснеженную поверхность Центральной России, моментально охлаждается в нижних слоях атмосферы, образуя адвективные туманы. Более простые и также более прозрачные — это **туманы испарения**, которые образуются из-за процесса испарения влаги с водных поверхностей. Обычно они возникают над небольшими водными поверхностями, такими как небольшой пруд. Над большими реками обычно этого не происходит, потому что образуется неустойчивость, связанная с тем, что поверхность воды теплее, чем воздух. Начинает развиваться конвекция, и водяной пар уносится выше, не накапливаясь непосредственно над водным зеркалом.

Среднее количество туманов для территории земного шара - до 80 дней, то есть в среднем приблизительно каждый 5 день – это день с туманом. В Арктике повторяемость туманов выше. Когда развивалась арктическая авиация, то ее основными проблемами были как раз арктические туманы, потому для малой авиации, которая ориентировалась исключительно на визуальные характеристики, туманы представляли достаточно тяжелое препятствие. Даже сейчас сильный туман при посадке воздушных судов в больших аэропортах Российской Федерации, таких как узел Шереметьево, представляет достаточно серьезную проблему. Когда аэропорт Домодедово перестраивался под самый первый терминал нового типа, то там была произведена мелиорация, в ходе которой был минимизирован процент повторяемости туманов. До этого самым туманным аэропортом Московского узла был Домодедово из-



за большого количества прудов, которые находились в районе угла посадки. Эти пруды были засыпаны, и с точки зрения микроклимата для посадки самолётов ситуация стала более благоприятной.

**Мгла** — это сильное помутнение воздуха, вызванное не продуктами конденсации, а твердыми частицами. Твердые частицы могут быть как естественного происхождения, вызванные пыльными бурями в пустынях и степях, так и антропогенного, например, при задымлениях при лесных пожарах и над промышленными городами. Одна из самых больших климатических трагедий последних лет в России — это лето 2010 года на европейской территории, когда Москва потеряла невынужденной смертностью 11 000 человек. Одним из самых опасных факторов как раз и была так называемая дымная мгла, которая образовалась от лесных пожаров на востоке области.

**Смог** — это сильный туман, который смешан с газообразными и твердыми примесями антропогенного происхождения. Смоги являются очень опасными явлениями, которые влияют на здоровье и продолжительность жизни людей. Лондонский смог пятидесятых годов явился первым опасным смогом, который установился на достаточно большой промежуток времени (порядка двух недель) и который повлиял на увеличение смертности. Ухудшение качества воздуха влияло на продолжительность жизни в Чикаго в 1984, в Европе и в особенности Франции в 2003, в Москве в 2010 и в южной Европе и Франции в 2019. Это волны тепла, которые были опасны для здоровья и статистически выразились в смертности. Количество людей, которое потеряли при каждой волне – от 700 в чикагской волне до 11 000 в Москве.

Классический смог - «лондонский» смог - смесь тумана и дыма от сжигания угля. «Лос-анджелесский» смог — это фотохимический смог, который образуется в результате реакции между примесями в атмосфере и каплями тумана. Смог можно определить по цвету плёнки, которая над Москвой бывает неестественного сизо-фиолетового цвета. Самые сильные смоги наблюдаются последние годы регулярной основе в китайских городах. Основное время для существования смоговых явлений — это зима, когда над Китаем преобладают антициклональные условия.

Кроме тумана существуют другие наземные гидрометеоры - продукты конденсации на поверхности Земли и на предметах. Это роса и жидкий налет (подтаявший иней), иней и твердый налет, и для их образования не нужно никаких осадков. Гололед и изморозь — это самые опасные явления. Из-за них падают деревья и опоры линий электропередач, и в 2011 году часть Московской области после достаточно обширного ледяного дождя, сопровождавшегося гололедом, около недели находилась в обесточенном состоянии. В Европе гололед бывает более агрессивным и опасным. В окрестностях Женевского озера гололеды наиболее живописны.

### **Атмосферные осадки.**

Помимо явлений конденсации есть **атмосферные осадки** — это капли воды и кристаллы льда, выпадающие из облаков или охлаждающиеся из воздуха на поверхности Земли и предметов. Количество осадков измеряют высотой слоя воды в миллиметрах. При визуальной оценке осадки делят на слабые, умеренные и сильные, но их количественное выражение всегда выражается в миллиметрах. Для получения 1 мм слоя нужно вылить 1 литр воды на поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>. В трагедии Крымска выпало 270 мм осадков за 12 часов, то есть на каждый квадратный метр наклонной поверхности было условно вылиты 27 вёдер воды.

Из облаков выпадают два вида осадков: **твердые** и **жидкие**. Когда они находятся в смешанном виде, то они называются смешанными. К твердым осадкам относится **снег** - ледяные или снежные кристаллы, которые имеют форму звездочек или хлопьев. У любой снежинки количество лучиков кратно трём, потому что молекулы воды состоят из двух атомов водорода и одного атома кислорода. **Снежная крупа** — это непрозрачные сферические крупинки белого цвета диаметром 2-5 мм. **Снежные зёрна** - маленькие непрозрачные матово-белые палочки диаметром менее одного миллиметра. **Ледяная крупа** — это ледяные прозрачные крупинки диаметром обычно до 3 мм с непрозрачным ядром в центре. Любые осадки базируются на ядре конденсации, и чаще всего вокруг этого ядра конденсации возникает непрозрачное ядро. **Ледяной дождь** — это прозрачные ледяные шарики размером от 1 до 3 мм. Он является одной из разновидностей гололеда. Бывают ледяные дожди, которые при выпадении этих шариков находятся в переохлажденном состоянии, и в таком случае они замерзают на предметах. Выпадающие осадки находятся в жидкой фазе и замерзают непосредственно при приближении к земле. Ледяной дождь способствует падению линий электропередач и гибели деревьев. Самое опасное явление для сельского хозяйства – **град**. Это кусочки льда разных форм и размеров диаметром 1-3 см, иногда не более 10 см. Нельзя судить о размерах града на земле, потому что градины обладают свойством слипаться друг с другом, приобретая на земле более внушительные размеры. В районе Ставропольского края град наносит одни из самых больших на территории России потерь для сельского хозяйства, потому что он бьёт посевы. По размеру града можно сделать косвенные выводы о мощности кучево-дождевого облака. Справедливо и обратное: по мощности кучево-дождевого облака можно понять, будет ли выпадать град или нет. Чем выше облако, тем больше вероятность образования в нём града и тем больше размер градин.

К жидким осадкам относятся **дождь** - капли диаметром половины миллиметра до 7 мм и **морось** - капли диаметром от 0,05 до 0,5 мм, находящиеся во взвешенном состоянии. Смешанные осадки — это **мокрый снег**, который является тающим снегом или смесью снега с дождём. Самая тяжёлая ситуация для современного прогнозирования – это точный прогноз смешанных осадков.

По характеру выпадения различают три вида осадков. Это **обложные** осадки, которые выпадают прежде всего из слоистых облаков, **ливневые** осадки, выпадающие только из кучево-дождевых облаков, и **морсящие** осадки, которые тоже выпадают в основном из слоистой облачности.

Процесс образования осадков назван по имени одного из первых синоптиков современности. В Норвегии, в Бергене, в 1918 году вышла работа Тура Бержерона «Образование осадков». Названный по его имени **бержероновский процесс** определяет момент старта выпадения осадков. Для того, чтобы этот процесс запустился и началось образование осадков, в одном облаке должно одновременно присутствовать сразу три фазы влаги: газообразная, жидкая и твердая. Если вода присутствует в трех фазах, то запускается бержероновский процесс и идут осадки. Это ответ на вопрос, почему над инверсионными областями рядом с пустынями западных побережий осадков практически нет, хотя облачность развивается. Из-за того, что облака не растут вверх и не могут достигнуть той температуры, при которой начнётся образование ледяной фазы, из них не выпадает осадков.

### **Электричество облаков и осадков.**

Перемещающиеся капельки влаги рождают и приобретают электрические заряды. Обратите внимание, что капли облаков и туманов чаще бывают электрически заряженными, чем нейтральными. Особенно сильные заряды возникают в кучево-дождевых облаках, где происходит скопление разноименных зарядов в противоположных частях облака. Это выражается в образовании разрядов в виде молний и гроз. Причины электризации этих элементов не совсем ясны. Это как захват ионов капельками и кристаллами, так и столкновение капель разного размера, дробление и разбрызгивание капель, а также постоянные процессы перехода из одного агрегатного состояния в другое, то есть замерзание переохлажденных капель на кристаллах. Если взять большую градину размером с мячик для настольного тенниса и разрезать её лазером пополам, вы увидите, что она состоит из огромного количества слоев, как кочан капусты. Эти слои она приобретает, путешествуя по облаку вверх и вниз. Таким образом, замерзание переохлажденных капель меняет ещё и электрический фон. В связи с этим происходит образование грозы. Это явление связано с развитием кучево-дождевых облаков и выпадением из них осадков, в которых проявляется атмосферное электричество. Грозы бывают только в нижней тропосфере, но разряды бывают не только между облаком и землей, но и между различными облаками и частями облака.

Облака разряжаются как над землей, так и над океаном. В различных районах Земли повторяемость гроз разная. В тропиках дней с грозами 100-150 над сушей, над морем их меньше – 10-30; в субтропиках от 20 до 50, в наших широтах от 10 до 30. В полярных широтах грозы — это единичные явления из-за того, что облака не могут развиваться настолько высоко, чтобы сформировать грозовое облако.

На земном шаре одновременно происходит почти 2 000 гроз. Главный максимум распределения гроз - экваториальная зона от Гвинейского залива в глубь континента. Меньше всего гроз в холодных областях, там, где конвекция подавлена. Много гроз над морским континентом Индонезия. Также гроз много над Австралией, в данном случае они сухие. В России больше всего гроз происходит на Черноморском побережье, что связано не только с теплым Чёрным морем, но и с наличием горной гряды, над которой развиваются грозовые облака. Второй максимум находится ближе к Приморью.

### **Снежный покров.**

**Снежный покров** образуется при устойчивых отрицательных температурах воздуха. Краткосрочные похолодания с выпадением снега не образуют снежного покрова. Устойчивый снежный покров образуется, начиная с умеренного типа климата. Над Гренландией и Антарктидой он постоянный. Число дней со снежным покровом увеличивается на территории России от юго-запада до северо-востока. Местами существуют районы, в которых более 300 дней держится снежный покров. Высота снежного покрова четко привязана к рельефу. Она максимальна на Камчатке и на Урале.

Основные климатические значения снежного покрова — это обеспечение запаса воды для рек, которые имеют снеговое питание, а также предохранение почвы от промерзания. Если бы не было снежного покрова, то озимого земледелия не существовало бы также. Кроме того, снежный покров охлаждает воздух и образует приземную радиационную инверсию температуры. Если бы не было снега и не существовало приземных радиационных инверсий, минимумов температуры Оймякона не возникло бы. Приземные инверсии - основной метеорологический механизм загрязнения воздуха в том слое, в котором мы с вами живем. Именно из-за него существуют государственные программы борьбы за качество воздуха в загрязнённых городах Соединенных Штатов Америки. Один из самых грязных городов — это Фэрбенкс, который находится практически в арктическом типе климата. Формирующиеся инверсии с большим количеством автомобильных выхлопов делают воздух слабо пригодным для дыхания при низких температурах. При одинаково загрязненном воздухе вреднее в нём жить в холодных условиях, потому что дыхательная система немного сужается естественным образом при понижении температуры, и грязь становится для неё более опасной.

**Снеговая линия** – это граница в горах, выше которой круглый год сохраняется снежный покров. Когда делают керны в горных ледниках, то всегда работают с ледниками, которые находятся выше снеговой линии.

### **Тепловой баланс земной поверхности.**

Как мы выяснили из уравнения радиационного баланса, какая-то часть энергии не уходит обратно, а поглощается деятельным слоем земной поверхности. **Деятельный слой** — это практически то же самое, что и географическая оболочка. Это нижняя часть

атмосферы, в которой происходят тепловые процессы, и та часть почвы, в которой происходят изменения теплосодержания. На масштабах времени в одни сутки деятельный слой будет от метра глубины почвы до первых десятков метров, а годовой деятельный слой захватит слой почвы до 19 метров. Чтобы определить, на какую глубину распространяются колебания температуры в почве, нужно взять корень из предыдущего периода колебаний, то есть суточного. В деятельном слое идет накопление тепла, но оно не полностью остается. На основе турбулентности развивается конвекция, и появляются **турбулентные потоки**. С помощью турбулентности передаётся наверх не только тепло. Турбулентный поток также называется **турбулентным потоком явного тепла**. Когда наверх выносятся таким же образом влага, которая выконденсируется, то это приводит к образованию турбулентного потока влаги.

### Формула теплового баланса

$$R - H - \Psi - LE = 0,$$

где  $R$  – радиационный баланс земной поверхности

$H$  – турбулентный поток тепла между земной поверхностью и атмосферой

$\Psi$  – поток тепла между земной поверхностью и нижележащими слоями почвы или воды

$LE$  – турбулентный поток влаги

В сложных ландшафтах деятельный слой — это не только почва. В Москве это ещё и стены зданий, в лесу - стволы деревьев, то есть это всё то, что способно нагреваться.

### Тепловой баланс деятельного слоя

$$\frac{\partial \langle c\rho hT \rangle}{\partial t} \equiv \Psi = B - H - LE$$

$$H = -c_p \rho k \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$E = -\rho k \frac{\partial q}{\partial z}$$

По аналогии Рейнольдса коэффициенты турбулентного обмена не зависят от того, чем обмениваются, от тепла или от влаги. Если есть какая-нибудь примесь в воздухе, то для этой примеси коэффициент турбулентного обмена будет одинаковым. Коэффициент турбулентности обычно зависит от скорости ветра и от шероховатости земной поверхности. Минимальную шероховатость имеют снежные поля Гренландии и невозмущенный океан. Наибольшая шероховатость - у застроенных даунтаунов, а также сильно выраженных форм рельефа, таких как Большой каньон или одиноко

---

стоящие скалы. При возмущении подстилающей поверхности сильно улучшится перемешивание и увеличится турбулентный обмен.

На поглощение водяным паром и аэрозолями уходит практически 1/5 инсоляции, приходящей на верхнюю границу атмосферы. С помощью альбедо можно охарактеризовать отражательные свойства абсолютно любой поверхности, можно охарактеризовать и турбулентность, развитую над любой поверхностью. **Отношение Боуэна** — это отношение потока явного тепла к потоку скрытого.

$$\beta = \frac{H}{LE}$$

В пустынях оно будет максимальным и может достигать нескольких десятков, над морями оно будет лишь доля единицы. Зная отношение Боуэна, вы знаете характеристику ландшафта. Минимум распределения плотности потока явного тепла находится над Антарктидой и над Гренландией, максимумы - непосредственно над пустынями и поверхностями, занятыми континентами. Если мы заменим земную поверхность на океан, то изменится деятельный слой, который будет достигать в океане сотен метров за счет циркуляции и обмена теплом с нижележащими слоями.

## Лекция 9

### Климатическая комфортность и климат города.

Исследования климата городских агломераций началось достаточно недавно – 50 лет назад. Почему климат городов надо изучать отдельно?

На этот вопрос есть один простой ответ: во-первых, это красиво. 7 лет назад было открыто явление, которое называется облачное цунами, потому что с одной стороны оно похоже на настоящее цунами, а с другой стороны оно облачное и безопасное. Когда воздух поднимается, он приближается к состоянию насыщения, и водяной пар в нем начинает конденсироваться. Приблизительно то же самое происходит на Панама Сити Бич во Флориде, но потоки, которые вынуждены подниматься интересной застройки побережья, формируют непривычные человеческому глазу формы облачности и тумана. Если вы посмотрите на фотографию Европы, сделанную со спутника в темный период суток, вы сразу же увидите, где находятся основные светящиеся и потребляющие энергию агломерации. Одно из первых возражений по поводу изучения процесса потепления климата было связано с тем, что метеостанции со временем стали испытывать влияние города. Они стали теплее не потому, что потеплел климат, а из-за того, что города вокруг них разрослись. Тогда из рассмотрения в системе убрали метеорологические станции, которые находились в пределах светлых кружков агломераций, и ничего особенно не изменилось. Основные городские агломерации — это Москва, Париж, который похож на Москву по своим микроклиматическим характеристикам, Рур и Южная Англия. Впервые за всё время современных цивилизаций городское население превысило сельское по процентному соотношению приблизительно в 2011 году. До этого все наши цивилизации, связанные с земледелием, были сельского характера. По прогнозам ООН, городское население продолжит расти, и мегаполисы развивающихся стран увеличивают численность жителей более активным образом.

### Городской остров тепла.

Основа наших знаний о климате - данные метеорологических станций. Основная московская станция находится на ВДНХ и расположена в комплексе зданий Всемирной выставки. Именно для неё делаются те самые прогнозы, которые вы слышите по телевизору. Метеостанции всего мира выглядят одинаково, даже в полярных областях. Посмотрев на плотность метеорологических станций в мире, вы увидите, что она, как и всё на нашей планете, неоднородна. Метеостанций на территории России мало, особенно в восточных частях страны. Как и населения, плотность метеостанций высока в Европе, в странах Гвинейского залива, в Восточной Азии, частично в Соединённых Штатах Америки и населённой части Южной Америки. Городская застройка приводит к образованию микроклиматического феномена, который известен как **городской остров тепла**, когда в городе становится теплее, чем за городом. Над городом в даунтауне, или в центре города, всегда теплее, чем в районах малоэтажной застройки, и

заметно теплее, нежели в пригороде. Это явление особенно сильно проявляется в осенние дни, когда разница температур в Москве и пригородах может достигать 10-15 градусов. В центре на Арбате может быть слабый плюс, а в пригородах температура падает до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Эти эффекты рожают различные экологические последствия. По теории вероятности можно посчитать вероятность возникновения экстремальных значений температуры в Москве и области. Средняя июльская температура (осреднённая за самый тёплый месяц) -  $25^{\circ}\text{C}$ . Для сравнения, реальная температура составляет всего лишь  $18,4^{\circ}\text{C}$ , то есть почти на 7 градусов ниже. В центре Москвы вероятность будет составлять 4%, а в пригородах – 0,9%, практически в 5 раз меньше. Именно в городах происходят наиболее опасные климатические события, которые оказывают влияние на экономику и население. В Москве 2010 года средние температуры были выше на 7 градусов, чем обычно, и в июле-августе наблюдалась непрерывная тепловая аномалия. Это сразу же повлияло на возникновение пожаров, дымом от которых затянуло всю Москву, включая Красную площадь. Максимальная температура достигала  $38,1^{\circ}\text{C}$ . Очень редко температура в Москве превышает температуру человеческого тела. Экологически это очень неблагоприятно, и печальные последствия выражаются в росте человеческой смертности. Если сравнить все волны жары, которые известны в мире, то чикагская волна 1984 года унесла жизни 900 человек, во Франции в 2003 году – несколько тысяч, в Москве в 2010 – 11 000 человек. При этом рост смертности был неодинаковым в городах и в областях, и в городе он был выше на 25-30%, то есть города являются опасными точками во время таких неблагоприятных событий. По сообщениям департамента здравоохранения Москвы до декабря наблюдались учащенные обращения людей с проблемами дыхательной системы.

История изучения городского острова тепла достаточно обширна, и основным эффектом был открыт в последние 50 лет, но Люк Ховард (который придумал классификацию облачности по ярусам) как-то сравнил температуру, которую он измерял у себя за окном, с температурой в Гринвиче, бывшем в начале XIX века глубоким пригородом. Даже до начала широкой промышленной революции в городе всё равно в среднем в зимний период было гораздо теплее, чем в пригороде. История изучения началась после Второй Мировой войны, и для этого понадобились новые средства измерений. В Гётеборге, в Швеции, были целые народные волнения, когда одну из центральных улиц перекрыли для организации так называемых вышек наблюдения. Это метеорологическая вышка, в которой наблюдения за качеством воздуха, температурой и скоростью ветра ведутся на разных уровнях. Улица стала, естественно, закрытой для проезда, но тем не менее стала одной из первых, в которой была реализована система городского мониторинга. Это важно, потому что метеостанций в городе обычно немного, и они располагаются не в центральной его части.

Когда появились первые спутники, океанология очень сильно рванула вперед, потому что впервые стало возможным изучать большие территории и сравнивать с такими



параметры, как площадь покрытия ледяным покровом, например, в Арктике и изучать распространение и неоднородность солёности на разных глубинах. Городская метеорология оказалась не такой подверженной технологическому прорыву со спутника, потому что, если вы встанете в жаркий день в узкой улице, вы обнаружите, что тепло к вам приходит не только от поверхности асфальта, но ещё от зданий. Летом вы можете усугубить ситуацию, если встанете на улице, на которой много кондиционеров. За счет теплового насоса они уменьшают температуру в квартире, а температура на улице увеличивается. Эти эффекты не видны со спутника. Незасчитанный рекорд минимальной температуры над Антарктидой был отмечен с японского спутника, который показал  $-94^{\circ}\text{C}$ , что на 5 градусов ниже абсолютного рекорда на станции «Восток». Точность измерения температуры, особенно в полярных широтах, гораздо ниже, и спутник измерял температуру снежной поверхности, а не воздуха, поэтому рекорд опровергли. Когда мы видим со спутника ядро жары в даунтауне, мы должны иметь в виду, что с помощью атмосферной циркуляции оно сразу же разносится по пригородам, то есть имеется температурная диффузия. Это можно сравнить с тем, как тепло от батареи разносится по квартире. Если бы этого не происходило, то во всей квартире был бы холод, но у батареи можно было бы жарить шашлыки.

Самый большой город в середине семидесятых моментально был подвергнут подобного рода исследованиям. Температурные изотермы внутри Мехико показывали температуру в центре до  $+9^{\circ}\text{C}$ , а на периферии – около 2, то есть разница составила 7 градусов. Для сравнения, такая разница может наблюдаться между Москвой и Ростовом-на-Дону, то есть между поясами разной зональности. Тогда же, в семидесятые, был открыт эффект охлаждения, которое вносят городские парки. Замкнутые изотермы холода находятся над парками. С тех пор лучше никто ничего не придумал: если хотите избежать проблем с высокой температурой летом в городе - правильным образом располагайте зелёные зоны. При этом, сделав один большой парк, скорее всего ситуацию в даунтауне вы не исправите. Москва до сих пор остается единственной столицей, имеющей в своём составе такой большой национальный парк - Лосиный остров, но на центр он не очень сильно влияет.

Временное развитие острова тепла неоднородно по времени суток. Минимум температур находится перед рассветом, а в отдельных городах в городе ранним утром холоднее, чем в пригороде. Это происходит из-за того, что солнечные лучи перехватываются верхними слоями зданий и не доходят до того уровня, в котором происходит движение и основная жизнь, то есть до 5 метров. Максимум разницы между городом и пригородами приходится приблизительно на 22:00 местного времени.

Первые попытки обрисовать саму структуру города были чрезвычайно примитивны. Прикинув среднюю высоту зданий и среднюю ширину улиц, можно получить среднюю плотность застройки. По аналогии с геоморфологическими каньонами выделяют

**городские каньоны.** Они разные в разных городах, и их соотношение плотности будет абсолютно разным. Чтобы прикинуть неоднородность городской тепловой аномалии, можно сравнить между собой плотной застройки, то есть посчитать отношение высоты к ширине каньона. В Москве на Ленинском проспекте это значение составляет порядка 0,6, а в историческом центре Москвы приближается к единице. Самые плотно застроенные города - Гонконг и Сингапур, где плотность достигает 3-4 единиц.

Минимум температуры перед рассветом наблюдается над естественной поверхностью, а над застроенной его практически нет. В районе излуины реки Москвы у Лужников находятся островки холода. Ветер в Москве располагается тоже неоднородным образом.

С помощью более сложных инструментов, а именно моделей, которые могут спрогнозировать распространение примесей в городской застройке, можно проанализировать такой опасный момент, как взрыв цистерны хлора в центре города. Концентрации вещества распространяются достаточно далеко по направлению ветра и городской застройки. Правильной застройкой можно изменить экологию города, например, улучшить качество рассеивания автомобильных выбросов.

В более широком городском каньоне при любом направлении ветра, даже перпендикулярном, примесь выдувается за счет естественной циркуляции. Если каньон кубический, то всё не только не выдувается, но и прибивается ниже к основному слою, в котором проходит наша жизнь. Неправильно спроектировав город, вы можете обречь его на существующие эпизоды опасных концентраций загрязняющих веществ. Обратное тоже верно: если просто изменить структуру застройки, вы практически не тратите средства на улучшение экологии в городской среде, а просто улучшаете вентилируемость и понижаете уровень концентрации.

Самое опасное усиление ветра в Москве за всю историю наблюдалось 22 июня 1998 года. Падающие деревья и рекламные билборды привели к жертвам и огромному количеству повреждённой инфраструктуры. Каждый архитектор, который сейчас разрабатывает или планировку района, или новое здание, должен оценить своё здание либо в аэродинамической трубе, промоделировав его. Если в среднем ветер со скоростью 0,8 м/с входит в каньон под углом  $45^\circ$ , то на верхних ребрах возможно усиление до 1,6 м/с, то есть ровно в 2 раза. Когда мы говорим, что ураганных скоростей ветра в Москве не зарегистрировано, мы говорим только о метеорологических станциях. В городской застройке, скорее всего, это происходит, потому что, если умножить скорость порывов ветра в 15-20 м/с на два, то автоматически получится 35-40 м/с. Таким образом, для каждого момента создается карта опасности ветра, которая соответствует основному направлению, например, для лета в Москве оно северо-западное.

## **Метеорологическая комфортность.**

Любое живое существо устроено таким образом, что в случае попадания в неблагоприятные условия внешней среды оно стремится своими поведенческими возможностями изменить это влияние. Уравнение собственного микроклимата — это уравнение в том числе теплового баланса, которые мы выписывали для Земли, но оно также работает и для человеческого тела. Как и в случае с земной поверхностью, основным его приходным членом будет прямая солнечная радиация. Даже на разных сторонах улицы для человека создается совершенно разный тепловой микроклимат.

Только одним из **факторов, которые влияют на термический комфорт человека**, являются климат и метеорологические параметры: это температура воздуха, скорость ветра и влажность воздуха. Вторым по уровню влияния будет скорость метаболизма внутри вашего тела. Правильно поддерживая тело в здоровом состоянии, вы создаёте постоянную температуру внутри и на поверхности. Однако для того, чтобы поддерживать её в разных условиях, нужна разная скорость протекания метаболических реакций. Если в холодных условиях вы не ели весь день, то, скорее всего, вы замерзнете гораздо раньше, чем если будете поглощать высококалорийную пищу. Третий уровень — это уровень физиологической активности. Он самый низкий у человеческого тела (приблизительно 20-40 Вт/м<sup>2</sup>), когда вы спите. Последний фактор — это теплоизоляционные свойства одежды. У животных это плотность и длина шерсти. Человек с помощью одежды изменяет термический комфорт только в одну сторону. Вы сохраняете энергию, когда одеваетесь. Именно поэтому более опасны тепловые эффекты и жара, потому что вы можете одеться в холод, но не можете раздеваться в тепле.

Самые простые индексы для оценки комфортности — это **индекс теплового стресса**, где отражены температура и относительная влажность, при негативном сочетании которых вам некомфортно. Его аналогом является **Wind Chill - индекс холодового стресса**. Исторически у нас есть свои холодовые индексы, которых было разработано порядка 20 в советское время, что было связано с освоением северных территорий. При сильном ветре обморожение может происходить и при положительной температуре. Примеры отечественных индексов — индексы эквивалентно-эффективной температуры по А. Миссенарду и Б.А. Айзенштату. В них учитываются температура, относительная влажность и скорость ветра. Это так называемый **простые индексы**, которые использовались в XX веке.

Более сложный индекс — **WBGT – температура чёрного шарика**. Чёрный шарик похож по термическим свойствам на человеческое тело. Этот индекс используется для определения безопасности проведения учений американского спецназа.

Сейчас популярен **индекс физиологически-эквивалентной температуры (PET)**. При его расчете учитываются все факторы, которые влияют на организм: солнечная радиация, уровень физиологической активности и температура воздуха снаружи. На

самом деле, люди могут находиться в состоянии естественного комфорта в разных условиях - спокойно сидя внутри нагретого дома или активно двигаясь на открытом воздухе. Физиологически-эквивалентная температура позволяет свести сумму всех ощущений, которые испытывает организм, к температуре воздуха в помещении. PET считается очень сложно с помощью привлечения моделирования процессов, в том числе и физиологии внутри вашего тела. У индекса есть только положительные градации, потому что в помещении чаще всего человек испытывает влияние положительной температуры. Более +41°C — это экстремальной стресс, ниже +4° градусов человек не может находиться без верхней одежды.

**Универсальный индекс теплового комфорта (UTCI)** используется в США.

**Индекс mPet** автоматически моделирует то, как человек одевается при разной погоде. Он преобразован из индекса PET, но основан на другом уравнении теплового баланса человека.

В самый жаркий день в истории Москвы на территории кампуса МГУ 30 июля 2010 года человек, который всего лишь провёл 3 часа посередине улицы Академика Хохлова, уже, скорее всего, получит тепловой удар. Если состояние здоровья плохое, то дело может закончиться инфарктом или инсультом. В то же самое время, если вы проводите время в тени деревьев Ботанического сада, случаев экстремального теплового воздействия не отмечается.

Различные города России по уровню термического комфорта неодинаковы. Самый безопасный из крупных городов – это Санкт Петербург. Даже в 2010 году в нём была очень низкая вынужденная смертность. Самый дискомфортный город — это Волгоград. Количество волн жары, которые наблюдаются в городах, не всегда подчиняется географическим условиям. В Москве самые опасные волны жары наблюдаются только в апреле, а самые опасные за весь период лета - в Омске. На такое распределение влияет южное положение и периодический вынос жары из пустынь Казахстана. При этом нехарактерность волн жары, то есть их непривычность для местного населения, максимальна для Омска, Казани и Москвы, но не для южных городов.

За прошедшие 40 лет посчитано, что анализу подвержено около 2000 городов земного шара, в том числе и вымышленные города. Наряду с Мехико и Парижем моделируются и климатические условия вымышленных городов, например, Королевской Гавани из «Игры Престолов». Исследования Австрийского метеорологического университета показали, что можно провести подобные исследования по микроклимату для вымышленного города, так как Королевская Гавань списана с естественного города и снималась в хорватском Дубровнике. Был запущен процесс микроклиматического моделирования для площади 10 на 6 км. Естественный рельеф Дубровника был получен из цифровых карт рельефа, а также было проведено районирование Королевской Гавани по методу застройки. Даже в вымышленном городе есть городской остров

тепла, а также городские острова холода, которые образуются за счёт не проникновения прямой радиации в глубокие городские каньоны. Были также построены вертикальные профили, уровни перемешивания и даже скорость и направление ветра. Когда на эти графики наложили уровень расселения, было показано, что даже вымышленных городах соотношение богатых и более бедных районов соответствует микроклиматическим характеристикам. Если в элитном поселке удалось создать хорошие условия проветривания, то население, достаточно платежеспособное, чтобы поддерживать этот хороший микроклимат, действительно его поддерживает. В бедных районах условия постепенно физически ухудшаются и переходят в менее комфортную категорию. Когда полученные закономерности наложили на реальную карту Вены, то оказалось, что наиболее дорогие районы, близкие к Венскому лесу, соответствуют более комфортным областям. Население поддерживает хорошие микроклиматические условия комфортности, если за это платит, и может способствовать их улучшению.

Что нас ждёт в Москве?

Самые примитивные сценарии показывают, что к 2050 году в среднем температура относительно начала века в каждом из административных образований (речь идет о старых границах Москвы) вырастет. Самый теплый район — это Центральный административный округ. В целом температура в нём вырастет за полвека на 1,2 градуса. Для сравнения, это больше, чем повышение температуры в ходе потепления климата за весь 20 век. Бороться с естественным изменением климата можно более грамотной планировкой и расположением зеленых зон. Это очень дорого, но хорошая экология поможет сохранить тысячи людских жизней, которые Москва потеряла в 2010.

Есть и другие варианты преобразования городского ландшафта. В Европе буквально озеленяют все, что возможно. В Штутгарте озеленяют рельсы, чтобы улучшить испаряемость и повысить комфортность проживания. Американский подход — это зелёные крыши. Сейчас в Москве существует только одна зелёная крыша, которая с большими проблемами консервируется на зиму. Основные пути борьбы с возрастающим в результате изменения климата тепловым загрязнением городов — это увеличение зеленых площадей и водных объектов. Второй путь — это применение в строительстве новых термически оптимизированных материалов. Если строить из термически индифферентных материалов, которые не накапливают в себе тепло, то это также будет экологически выгодно.

Итак, в свете изменения климата и его потепления температура растет. Опасность состоит в том, что эквивалентная температура растет гораздо быстрее, то есть дискомфортные условия с изменением климата ухудшаются быстрее, чем растет температура. Влияние потепления климата на организм более опасно, нежели просто температура.

# Лекция 10

## Барическое поле и геострофический ветер.

**Геострофический ветер** — это очень удобная модель ветра в атмосфере. Это такая связь поля давления с полем ветра, что, глядя на карты изобар, вы получаете представление о том куда, как и с какой силой и скоростью дует ветер.

Если мы хотим описать, например, движение, то в качестве уравнения, которое его описывает, должно быть использовано уравнение второго закона Ньютона.

$$m \frac{dV}{dt} = F_1 + F_2 + F_3 \dots$$

Если в качестве основы используется второй закон Ньютона, то мы, казалось бы, должны получить какую-то формулу, в которую включается время. Существует принцип, что любая система (в том числе циркуляционная) стремится к равновесному состоянию. Состояние равновесия подразумевает, что переходные процессы, развивающиеся во времени, прекращаются, и система находится во взаимно уравновешенном режиме. В этом смысле геострофические соотношения как раз представляют собой случай, когда силы барического градиента и сила Кориолиса уравновешивают друг друга. Получаются уравнения, которые не содержат времени.

Если система выходит из положения равновесия, то она будет стараться прийти к нему. В атмосфере при этом часто возникают волны. Волны уносят избыток энергии, и система снова становится в положение равновесия.

Геострофические соотношения на самом деле квазигеострофические. Бывает, что давление и сила Кориолиса выходят из равновесия, и тогда в системе возникают быстрые волны, которые приводят к тому, что поля давления и ветра снова оказываются согласованными друг с другом.

В реальности, помимо силы барического градиента и силы Кориолиса, есть ещё силы, но они не учитываются. Тут работает принцип, по которому для создания равновесия срабатывают самые большие компоненты, стоящие в правой части уравнения. В данном случае  $F_1$  и  $F_2$  успевают так быстро согласоваться между собой, что влияние других сил становится неважно.

Говоря о геострофическом режиме, мы можем посмотреть, что происходит не только в какой-то точке циклона или антициклона, но и на полушарии или на земном шаре в целом.

На земном шаре в полярных районах холодно, в тропических – тепло. Это сказывается на поле атмосферного давления. Пусть по отношению к плоскости земной поверхности существуют плоскости поля одинакового давления с величиной  $P_2$  и  $P_1$ . Поскольку в тропиках теплее, чем в высоких широтах, то расстояние между изобарическими

поверхностями больше в тёплом воздухе. Это приводит к своеобразному распределению барического градиента. Если в каждой точке Земли подниматься на воздушном шаре с барометром-анероидом, то на какой-то высоте  $Z$  можно получить давление  $P_2$ . Это давление в высоких широтах достигается на меньшей высоте, чем в тропиках. Барический градиент направлен от высокого давления к низкому. В ответ на заданное распределение температуры мы имеем всё время поддерживаемое радиационном режимом направление барического градиента. Получается, что в умеренных широтах должен преобладать западный ветер – то, что называется **западный перенос**. Он получается благодаря двум вещам:

- 1) распределение солнечной энергии такое, что нагреваются преимущественно тропические широты, что влияет на соответствующее распределение температуры, давления и направление барического градиента;
- 2) Земля вращается, из-за чего устанавливается геострофический баланс.

Этот феномен можно выразить с помощью изобар. Скорость ветра представим в виде двух компонентов. Первый — это зональная компонента скорости, которая направлена вдоль круга широты. Вторая компонента скорости — это меридиональный ветер, который направлен направо. В каждой точке земного шара мы выбираем зональную компоненту скорости ветра и рассматриваем средние значения за сезон. Такие значения рассматриваются на всех высотах, где есть измерения. Если мы рассмотрим зиму Северного полушария, то максимальными будут скорости ветра, направленного с запада на восток в средних широтах. В Северном и Южном полушарии они сосредоточены примерно на тридцатом градусе широты, потому что именно здесь расположены наиболее ярко выраженные градиенты температуры.

Западный перенос выражен далеко не во всей атмосфере и далеко не одинаково на всём протяжении высоких широт. Он сконцентрирован в струйные течения, которые расположены примерно на высоте 12 км, то есть приблизительно там, где заканчивается тропосфера. Максимальные значения скоростей располагаются под тропопаузой. Выше находится стратосфера, и в зимней стратосфере западный перенос продолжается, не прерываясь, и фактически все нижние слои атмосферы движутся с запада на восток. В летнем полушарии (то есть в Южном) западные ветры на высоте сменяются ветрами восточными, так как там поворачивается в другую сторону температурный градиент. Признаком перехода от зимы к лету является перестройка воздушных течений в стратосфере. Это означает, что вместо западного потока, который существует зимой, появляются потоки восточные.

В Северном полушарии с высотой это область экстремумов смещается в высокие широты и оказывается вблизи 60-70° северной широты. Здесь проходит граница полярной ночи. В стратосфере районы, расположенные ближе к полюсу, вообще не получают ни капли солнечного тепла и охлаждаются до довольно низких температур.

На границе полярной ночи максимальны температурные контрасты и максимальны скорости ветра. Посмотрим на тропические широты. Если мы берем осредненные значения скорости ветра, то получится, что там дуют очень слабые восточные ветры. На самом деле в низких широтах ветер не ослабевает по сравнению с широтами высокими. В низких широтах средняя картина нерепрезентативна. В средних широтах преобладает западный ветер, значения которого мы усредняем по широтам. В низких широтах над частью полушария преобладают восточные ветры, а над другой частью земного шара преобладают ветры западные, и при осреднении действительно получается маленькая цифра, близкая к нулю.

В стратосфере экваториальной зоны наблюдается так называемая квазидвухлетняя цикличность. Это такой удивительный феномен, когда два года ветер дует с запада на восток, а потом два года - с востока на запад. Если мы складываем совершенно противоположные скорости ветра, то получается цифра, которая не является репрезентативной.

### **Географическое распределение давления.**

Теперь посмотрим, как выглядит распределение давления у поверхности. В июле рассмотрим некоторые важные особенности этого поля. В субтропиках над океанами находятся области повышенного давления, причём в Южном полушарии, в котором не очень много материков, эта зона повышенного давления простирается практически по всем долготам. Области высокого давления — это так называемые субтропические антициклоны, область низкого давления между ними - область экваториальной ложбины. Эти субтропические центры иногда имеют собственные названия. В Северном полушарии в Тихом океане находится Гавайский антициклон, центр в Атлантическом океане называется Азорский антициклон. В Южном океане специальных названий нет, и там антициклоны называются Южно-Атлантический или Южно-Тихоокеанский, без привязки к конкретным объектам.

Там, где симметрично относительно экватора расположены два центра высокого давления, между ними устанавливаются восточные потоки – **пассатные**. Эти потоки очень устойчивые, в отличие от поля ветра, с которым мы сталкиваемся в умеренных широтах.

Между пассатами наблюдается сходимость воздушных течений к некоторой зоне, которая теоретически должна быть прямо на экваторе. Поскольку распределение материков и океанов несимметрично, она немного сдвинута, обычно в Северное полушарие. Возникает зона сходимости, или зона конвергенции, и поскольку она расположена в тропиках, то она называется **внутритропическая зона конвергенции (ВЗК)**.

Если в нижних слоях атмосферы имеется антициклон, то движение воздуха в нём происходит по часовой стрелке, но также происходит некое отклонение от центра. Если



это циклон, то в нём происходит движение против часовой стрелки, причём имеется тенденция сходимости воздушных течений. В области экваториальной ложбины с точки зрения распределения атмосферного давления и распределения скорости ветра происходит сходимость воздушных частиц. В этом случае воздуху некуда деваться, и он начинает подниматься вверх. Следовательно, в этом районе происходит массовое всплывание воздуха вверх, образуются облака, и возникает полоса облаков, которая называется облачность внутритропической зоны конвергенции. Это преимущественно кучево-дождевые облака, поэтому именно здесь выпадает много осадков. Если мы посмотрим теперь на умеренные широты в Атлантическом океане, в Северной Атлантике, то мы видим Азорский антициклон, а выше него – область пониженного давления. Эта область стабильно пониженного давления, расположенная около Гренландии и Исландии, называется Исландская депрессия. Как правило, давление снижено в районе Исландского минимума. Между центрами высокого и низкого давления возникают наибольшие градиенты давления от высокого к низкому. Здесь формируются наиболее сильные потоки западного ветра. В Южном полушарии эти потоки ещё более сильные, так как пояс высокого давления сплошной, и вдоль него полоса пониженного давления тоже сплошная.

Мы рассмотрели летнюю картину, а зимняя картина похожа, но все же не такая.

Увеличивается область Исландского минимума, Алеутского минимума. Азорский антициклон как бы «растворяется» в более широкой области, но он есть и, несомненно, работает. Гавайский антициклон тоже превращается в полосу высокого давления. В Северном полушарии возникают непостоянные области, такие как область очень высокого давления - Сибирский антициклон. Северное полушарие выглядят гораздо более сложным по сравнению с Южным, и эта сложность, выраженная в квазистационарных вихрях, связана с тем, что здесь суша и море чередуются. В Южном полушарии, преимущественно океаническом, этого нет. Имеется пояс высокого давления в субтропиках, а дальше давление понижается к полюсам, и здесь преобладают западные ветры – сильные, ровные, непрерывные.

Воздушные вихри привязаны к определенным термическим поясам и к определенным термическим характеристикам. Если происходит общее потепление или охлаждение полушария в сезонном ходе, то данный вихрь должен определённым образом или сместиться, или изменить свою конфигурацию. Иногда это приводит к серьезным изменениям в циркуляции. Например, если мы рассмотрим Тихий океан, то в тропиках изменения температуры от зимы к лету очень небольшие. Раз эти изменения небольшие, то и каких-либо принципиальных сдвижек здесь мы не получим. Зона конвергенции немного смещается от зимы к лету Северного полушария чуть к северу и наоборот (от лета к зиме к югу), и больше никаких изменений не происходит, так как температура океана меняется мало. А если мы рассмотрим Индийский океан, то в этом случае сезонные изменения будут довольно сильными. Антициклон, который обычно стоит в Южном полушарии, смещается зимой ближе к экватору. Как только воздушная

частица достигает экватора и пересекает его, она попадает в поле силы Кориолиса другого знака и поворачивает в другое направление. Начинается перетекание пассата через экватор, и восточные ветры сменяются на западные. Возникают так называемая экваториальные западные ветры – **муссоны**. Такие муссонные потоки появляются у Индостана, в Индонезии, ещё один муссонный поток — это муссон Гвинейского залива.

### **Общая циркуляция атмосферы.**

Рассмотрим одно полушарие, но не в виде карты, а в разрезе от полюса к экватору. В нижней тропосфере пассаты одного и другого полушария сходятся друг к другу. В итоге происходит подъём воздуха, и на этой поднимающейся массе возникает облачность внутритропической зоны конвергенции. Этот подъём достигает почти 18 км, и выше располагается тропопауза. В антициклонах происходит оседание воздуха, так как отток воздуха от центра приводит к тому, что в центральных частях наблюдается оседание воздуха. Наибольшие градиенты температуры в верхней тропосфере достигаются над антициклонами, и поэтому здесь возникает **субтропическое струйное течение (ССТ)**. Дальше, продвигаясь в умеренные широты, мы видим за антициклонами уже системы низкого давления. Здесь тропические воздушные массы контактируют с умеренными и полярными воздушными массами. Здесь самые большие температурные градиенты, и выражено это существованием зоны такого различия между этими массами, которая называется **атмосферный фронт**. В данном случае это так называемый **полярный фронт (ПФ)**. В более низких широтах находится тёплый тропический воздух, в более высоких широтах - воздух умеренный, и они обладают совершенно разными термодинамическими свойствами. Из-за того, что на фронте достигаются самые сильные контрасты температур, они отражаются в том, что возникает другая ось ещё одного струйного течения. Поскольку оно связано с полярным фронтом, то оно называется полярно-фронтальное струйное течение (ПФСТ). Эта струя она не так устойчива во временном и географическом смысле. Она может появляться и исчезать, перепрыгивать с одной широты на другую, потому что здесь происходит сильный циклогенез, из-за чего струйное течение перемещается вместе с циклонами.

Система подъёма и опускания воздуха в субтропиках — это так называемая **ячейка циркуляции Хэдли**. Хэдли - английский ученый, который очень давно обнаружил это явление. Далее возникает полярный фронт со своими принципиальными особенностями, выше – тропопауза. **Арктический фронт**, отделяющий полярные области от умеренных широт, не такой интенсивный, как полярный фронт. Полярный фронт — это планетарная особенность, которая свойственна вообще для любой планеты земного типа. Циркуляция есть не только на Земле, она есть на Марсе и на других землеподобных и марсоподобных планетах. На Венере такого явления нет. Там ситуация выглядит таким образом, что ячейка Хэдли простирается практически до полюсов, то есть воздух опускается в полярных широтах. Это происходит из-за

собственной скорости вращения планеты. Если скорость вращения планеты достаточно выражена, то ячейка Хэдли примыкает к экватору. Если планета не вращается, как в случае с Венерой, то подъём воздуха имеет чисто термическое происхождение, и опускание происходит там, где воздух уже остывает, то есть в полярных широтах.

Эта картина называется схемой **общей циркуляции атмосферы**. Предполагается, что в другом полушарии мы имеем симметричную структуру. На самом деле от этой схемы есть отклонения. Симметрия не всегда соблюдается, а также в таком зональном разрезе мы не можем увидеть муссоны и учесть правильное распределение моря и суши.

### **Циркуляционные системы разного масштаба. От общей циркуляции до мелкомасштабной турбулентности.**

Возникает такое представление, что в зависимости от того, на каком масштабе мы рассматриваем задачу, мы используем разные термины. Чем пространственно крупнее объект, тем большую мощность с точки зрения кинетической энергии он в себе несет. Циклон умеренных широт имеет большую энергию, чем ураган. Здесь важен размер объектов, хотя скорость ветра в тропическом урагане больше. По возрастанию кинетической энергии мы начинаем с мелкомасштабной кучевой конвекции, далее идут связанные с ней смерчи, торнадо, потом мощная кучевая конвекция и грозы. Далее кинетическая энергия продолжает возрастать в местных циркуляциях, таких как бора, фены, бризы, шквалы, дальше переходим к синоптическим системам – это ураганы, фронты и циклоны, и затем идут планетарные волны. При сопоставлении кинетической энергии можно заметить, что атомная бомба, которую американцы взорвали в Японии, имеет примерно такую же мощность, как хорошее кучево-дождевое облако. Это сопоставление дает ответ на вопрос: можно ли управлять погодными явлениями? Мы понимаем, что управлять каким-то явлением можно в том случае, если мы прилагаем к нему мощность, адекватную его мощности. Значит, если даже использовать в качестве такого управляющего агента атомную бомбу, в лучшем случае мы можем погасить только одно кучево-дождевое облако. В одной внутритропической зоне конвергенции в каждую секунду их десять тысяч штук, а в циклоне – сотни. Получается, что это несопоставимые вещи, если иметь в виду прямые воздействия.

Все явления существуют одновременно и существуют вместе. Они поддерживают друг друга и друг другом определяются. Например, у тропического урагана можно выделить полосу облаков, и если ураган относится к синоптическому масштабу, то эта полоса облаков уже относится мезомасштабу. Это не просто определение, а совершенно другая физика явления. По формуле, которую мы упоминали в начале лекции, мы имеем общие для всех задач уравнения гидромеханики. Особенность движения жидкости или сплошной среды воздуха заключается в том, что в зависимости от масштаба его размера в правой части и в левой части начинают работать разные причины. На синоптическом масштабе два главных явления — это барический градиент и сила Кориолиса. На мезомасштабе это будут другие явления, и в этом как раз и заключается

другая физика. На мезомасштабе выберем одно облако. Оно имеет сложную внутреннюю структуру. В нем разная по значению и направлению вертикальная скорость, а ядро, в котором расположена зона наибольшего подъёма, находится на окраине этого облака. В масштабе отдельного облака его физика снова другая и по сравнению с синоптикой, и с физикой линейных структур. Наконец, мы можем вырезать какую-то маленькую область, и это будет уже микромасштаб. Это будет трехмерная турбулентность со своими физическими процессами. На мелком масштабе сила Кориолиса не работает, так как частицы воздуха пролетают небольшие расстояния за такое короткое время, что Земля повернуться ещё не успела, и поэтому никакого динамического эффекта за счет вращения Земли получено не будет. На синоптическом масштабе, когда частица воздуха в течение десятков часов движется, например, от Кольского полуострова до Чёрного моря, то сила Кориолиса успевает на нее повлиять.

Влияние вязкости ощущается только на самых маленьких масштабах, а если масштабы немаленькие, то атмосфера практически невязкая, и это практически идеальная жидкость. Когда мы доходим до масштабов микроуровня, то вязкость начинает сказываться. Частица, которая движется, тормозится вязкостью, и кинетическая энергия уходит. Происходит переход энергии в тепло - вязкая диссипация.

Можно подумать, что обязательно существует строгая иерархия, то есть чем явление крупнее, тем оно главнее по отношению к меньшим. Однако это работает только в самом крайнем случае, когда микромасштаб сливает свою энергию в вязкость. Если бы мы занимались не атмосферой, а движением ледников, то в ледниках этот эффект был бы просто ключевой. У ледников переход в тепло энергии трения играет важнейшую роль в тепловом режиме и в динамике. Явления разного масштаба связаны между собой нехитрым образом, и крупные влияют на мелкие, но и мелкие влияют на крупные, то есть эти системы живут совместным образом. Например, у зоны конвергенции синоптические масштабы. Воздух должен подниматься вверх в отдельных кучево-дождевых облаках, которых возникает ровно такое количество, нужное для того, чтобы перебросить избыточную массу в верхние слои тропосферы. По временным масштабам мы можем выделить некоторые особенности. На масштабах секунд и минут эти явления связаны с турбулентностью, там, где это часы, то преобладающим явлением становятся так называемые гравитационные волны. К ним примыкают явления мезомасштаба, и везде физика явлений своя. На масштабах суток это синоптические явления, явления блокирования. На сезонных масштабах наиболее яркое явление — это осцилляция Маддена-Джулиана. На годовом и между годовом масштабах мы тоже можем выделить некоторые характерные структуры, такие как квазидвухлетнюю осцилляцию, явление Эль-Ниньо и другие осцилляции вплоть до десятков лет. За десятками лет идут сотни и тысячи лет, и тут уже начинаются изменения климата.

# Лекция 11

## Атмосферная циркуляция.

Масштабы атмосферных явлений могут быть самыми разными. Допустим, дым от сигареты — это микромасштаб. Мезомасштаб – если дым распространён над большим городом или, например, над Московской областью. Когда вы смотрите перемещение циклонических и антициклонических вихрей — это синоптический масштаб (тысячи метров). Над ним есть ещё один — это масштаб планетарных волн. Он определяет, условно говоря, вероятность перемещения серии циклонов (десятки тысяч километров).

Дымовые колечки сигареты — это самые маленькие турбулентные вихри. На самом большом масштабе энергия между атмосферными планетарными волнами постоянно переносится с масштаба на масштаб как снизу вверх, так и сверху вниз.

**Общая циркуляция атмосферы** — это система крупномасштабных воздушных течений на земном шаре, которые по размерам сопоставимы с материками и океанами. Когда мы говорим про изменения общей циркуляции атмосферы из-за глобального потепления, то в общем мы говорим о том, что изменяют своё направление движение воздушных течений, по масштабу сопоставимые с материками.

Простая ячейка циркуляции устроена очень примитивно. Там, где воздух нагрелся, он поднимается вверх, а затем опустился. Если эта циркуляция по размеру сопоставима с континентом и находится над тропиками, то это **ячейка Хэдли**. Посмотрим, как выглядит идеальное распространение давления у земной поверхности: низкое давление над экватором, высокое давление над тропиками и субтропиками, где располагаются субтропические антициклоны, затем снова понижение в умеренных и приполярных широтах и максимумы над полюсами. Сила Кориолиса отклоняет пассаты от прямолинейного движения воздуха из субтропических широт в экваториальные, и поэтому пассаты доходят к экватору немножечко по касательной. Их англоязычное название – trade winds - говорит об их применении. Вся мировая морская торговля формировалась через пассаты, то есть если вы хотели проделать на парусном судне маршрут Колумба, то основной нашей задачей было бы, конечно, попасть в пассаты и постепенно дойти в них до Вест-Индии.

В ячейке Хэдли над экватором в центре находятся кучево-дождевые облака, которые развиваются над экватором практически каждый день. Колебания давления внутри суток превышают колебания давления от месяца к месяцу и от сезона к сезону. В ячейке Хэдли над экватором воздух поднимается в тропосфере, ему нужно куда-то деваться, и он уходит под тропопаузой в тропические широты и там опускается в зоне субтропических антициклонов. **Ячейка Ферреля** — это приблизительно то же самое, но в более высоких широтах. Тропопауза понижается, потому что воздух в общем случае прохладнее, и стратосфера расположена уже гораздо ниже. Ячейки работают как

две синхронные шестерёнки, где воздух поднимается над экватором и приполярными широтами.

**Центры действия атмосферы** — это то, что формируется в результате общей циркуляции атмосферы. Это относительно постоянные области повышенного или пониженного давления (либо сезонного, либо постоянного характера). Зная про центры действия атмосферы, можно планировать долговременные перемещения. Когда в эпоху географических открытий планировались большие переходы, то в основном ориентировались как раз на положение постоянных центров действия атмосферы. Например, на парусном судне стремились попасть в пассаты, так как эти постоянные ветры не меняет своего направления даже от зимы к лету, и поэтому они очень удобны для судоходства.

В январе действует Исландский минимум, от которого к нам приходят все циклоны. Бабье лето нам приносит Азорский антициклон, который в зимний период достаточно выраженный. Самый главный центр действия атмосферы зимой в умеренных широтах — это Сибирский максимум (его еще называют Азиатским). К июлю Сибирского максимума уже нет, Исландский минимум становится достаточно слабым, зато усиливается Азорский антициклон, который и определяет летний туристический сезон в Западной и Юго-Западной Европе. В январе нет ничего сравнимого по мощности на всей планете с Сибирским антициклоном, но он действует только в холодное время года, то есть он не постоянный, а сезонный.

### **Циркуляция в тропиках.**

Самое главное явление в тропиках — это **пассаты** — устойчивые ветры в восточной четверти, дующие в течение всего года над океанами на обращенной к экватору периферии субтропических антициклонов. Идеальный антициклон над Северным полушарием будет вращаться по часовой стрелке и таким образом гнать пассаты к области низкого давления. В Южном полушарии всё зеркально отобразится и, соответственно, такие же пассаты будут двигаться с юго-востока к экваториальным широтам.

Слово «**муссон**» имеет арабское происхождение и означает «сезон». Это сезонные режимы воздушных течений с резким изменением преобладающего ветра от сезона к сезону. Пассаты постоянны, а муссоны меняют свое направление от лета к зиме и наоборот. Если трудно запомнить, то муссон — это большой бриз, то есть смысл этих явлений абсолютно одинаков. Когда температура над океаном выше, чем температура над сушей, то давление перераспределяется, и зимний муссон дует с материка на океан. Летом всё меняется. Если вы вдруг забыли, как это работает, вспоминайте, когда в российском Приморье наступает плохая погода. Летом там достаточно некомфортно, потому что при высокой температуре влажность воздуха поднимается выше 95%, что выше оптимальных для человека 70%. Муссоны наблюдаются на восточных побережьях материков с некоторыми исключениями в районе, например, полуострова

Индостан. За счёт циркуляционных особенностей и чрезвычайно высоких температур океана формируется такое уникальное явление, которое называется Индийским муссоном. На территории, которой соответствует полуостров Индостан с окружающими заливами, формируется своя циркуляция. Основная причина возникновения муссонов - разница в нагреве материков и океанов, но также работает и сила Кориолиса. Помимо этого, влияют ещё очертания материков, которые в принципе влияют и на океанические течения и микроклимат береговой линии, и, конечно же, орография и характер подстилающей поверхности. Пример взаимодействия муссона с орографией – Черапунджи. Именно там муссон упирается высокие Гималаи и не имеет возможности их перевалить, и вся масса воды вынуждена выливаться в одном узком месте, где создаются рекордные осадки. Однако не очень правильно говорить о том, что Индийский муссон никогда не переваливает Гималаи. Иногда на картах Средней Азии можно видеть «отголоски» осадков, но основная масса осадков выливается, конечно же, в более низких широтах. Муссоны наблюдаются в тех районах, где циклоны и антициклоны обладают достаточной устойчивостью и резким сезонным преобладанием. К примеру, на Камчатке уже существует не муссон, а муссонная тенденция, во-первых, из-за широты, а во-вторых, из-за отсутствия устойчивости и перемещения циклонов. В районе Индии и Юго-Восточной Азии муссоны приобретают свою наибольшую мощность. В тропических широтах океаническая поверхность и поверхность континентов очень сильно различаются по нагреву. **Термический экватор** — это воображаемая линия, которая располагается приблизительно на  $10^\circ$  с.ш. и которая делит нашу Землю по уровню нагревания на две равные части. Термический экватор не совпадает с реальным именно за счёт преобладания материков в Северном полушарии. Зимой муссон дует с Азии на океан, летом – наоборот, с тёплых океанических поверхностей. 75% дождей в Индии летом как раз связаны с Индийским муссоном. За счёт запаздывания муссона 2003 году сформировались условия очень сильной жары ( $45-49^\circ\text{C}$ ), и, как минимум, 1500 человек стали жертвами этой волны жары. Это произошло из-за того, что муссон опоздал где-то на две недели. Обычно муссон приходит в конце весны, когда в Индии в это время Солнце находится практически в зените. На экваторе такие условия не формируются из-за высокой облачности.

Помимо муссона существует ещё такое важное понятие, как внутритропическая зона конвергенции. Поскольку пассаты движутся и в Южном, и Северном полушариях от тропиков к экватору, понятно, что в какой-то момент эти воздушные массы должны сходиться и воздух должен куда-то деваться по закону сохранения массы. То самое место, где происходит сходимости пассатов, — это зона облачной гряды. Она характеризуется неустойчивыми, в основном слабыми, но иногда и шквалистыми ветрами и имеет достаточно сложное строение. Она не совпадает ни с экватором, ни с термическим экватором, не протягивается полностью субширотно, то есть отклоняется

над океанами и континентами в разные стороны. Во внутритропической зоне конвергенции формируются очень высокие кучево-дождевые облака.

### **Тропические циклоны.**

Явлением, которое в тропиках может привести к шквалистым и ураганым ветрам, являются **тропические циклоны**, скорость ветра в которых достигает 50 м/с, то есть приблизительно 190 км/ч. Они могут возникать между 20 и 5° широты в каждом полушарии. Южнее, условно говоря, 5 градуса, ближе к экватору, силы Кориолиса недостаточно, чтобы тропический циклон закрутился. Такие циклоны развиваются исключительно над морем, то есть такая термодинамическая машина наращивает свою мощность исключительно из-за процессов испарения влаги. Они развиваются над морем, но в ходе своего перемещения заходят на сушу и наносят наибольший ущерб, поскольку теряют связь с океаном. Когда тропический циклон выходит на обитаемую территорию, он неизбежно начинает разрушаться, и если он не возвращается на океан, то он, скорее всего, распадается в самом ближайшем времени.

Как выглядит разрез циркуляции в тропическом циклоне? В глазу тайфуна за счёт сформировавшихся нисходящих движений воздуха нет ни облачности, ни осадков, ни порывов ветра. В плане разрушений тропический ураган наряду с торнадо (которые образуются, наоборот, над сушей) — это наиболее разрушительные явления атмосферного характера. Высокие скорости ветра наблюдаются в супертайфунах (50 м/с). Максимальные скорости ветра в атмосфере наблюдаются не у поверхности и достигают порядка 116 м/с (около 400 км/ч), что можно сравнить со скоростными поездами во Франции или в Японии. Максимальная повторяемость тропических циклонов приходится на лето и осень, когда внутритропическая зона конвергенции находится за пределами 5° от экватора, а поверхность океана сильно прогрета (не ниже 27°C). Один из вопросов, который стоит перед теоретической тропической климатологией, связан с потеплением климата. Будет ли расти количество тропических циклонов и, что важно, сильных тропических циклонов, которые будут наносить ущерб? Если происходит разогрев приземного слоя, то должен нагреваться и океан, а если нагревается океан, то он большее количество раз достигнет критической температуры. Приведет ли это к повышению повторяемости опасных тропических циклонов? На этот вопрос существует несколько мнений, но о них расскажем немного позже. Если эти условия отсутствуют, то тропические циклоны не возникают. В некоторых частях Мирового океана наблюдаются «дырки» в повторяемости тропических циклонов. Это, например, юг Атлантического океана и юго-восточная часть Тихого океана. Повторяемость тропических циклонов чрезвычайно высока, например, на северных побережьях Австралии. Считается, что с потеплением климата придут изменения циркуляции, и это может стать опасным, потому что изменятся пути движения. Тайфуны и тропические ураганы могут прийти в районы, где они до этого имели менее высокую повторяемость, и это, конечно, большая проблема.



Тропические циклоны имеют различные названия в разных географических районах. **Ураганы** — это Атлантика, **орканы** - Индийский океан, **тайфуны** — это Восточная Азия. В районе Австралии они называются достаточно нежно – **вилли-вилли**.

Наибольшая повторяемость тропических ураганов отмечается в районе тёплого океана у юго-восточной Азии – примерно 27 в год, у восточного побережья Северной Америки - в 3 раза ниже. Также лидируют по количеству ураганов область к западу от Мексики и южная область зарождения к северо-востоку от Австралии. При движении к Ближнему Востоку их повторяемость заметно уменьшается (меньше двух в год у побережья Аравийского полуострова).

При прохождении Нового Орлеана тропический ураган Катрина (2005 год) вызвал волновое движение и заодно обрушил защищавшую Новый Орлеан дамбу, из-за чего произошло частичное затопление города. До сих пор ураган Катрина является историческим лидером по нанесенному ущербу, хотя по своей мощности и скорости ветра он, конечно, был не самый значительный.

### **Атмосферная циркуляция умеренных широт.**

Атмосферная циркуляция умеренных широт – это та циркуляция, которую мы видим над собой практически каждый день. Наилучшее время для изучения циклонических циркуляций – осень. Метод предсказания по синоптической карте еще лет двадцать назад был главным в предсказательной метеорологии. Важным понятием является понятие воздушной массы.

**Воздушные массы** — это массы воздуха, относительно однородные в горизонтальном направлении по своим физическим свойствам, но отличающиеся от соседних масс. Воздушные массы — это идеалистическое представление о том, что именно происходит во взаимодействии воздушных масс разного характера и где рождаются погодные явления, то есть взаимодействие воздушных масс и их перемещения определяют погоду территории. Это относится в основном к умеренным широтам, потому что в тропических широтах и зимой, и летом преобладают тропические воздушные массы, которые меняются только в результате уменьшения или увеличения нагрева. **Атмосферный фронт** — это поверхность раздела между воздушными массами и проекция этой фронтальной поверхности на приземную синоптическую карту. Атмосферный фронт — резкое изменение свойств воздушных масс. Обычно говорится про температуры воздушных масс, но иногда можно говорить и про относительную влажность. Фронт может быть либо стационарным, если он сильно не перемещается относительно своего географического положения, или подвижным. Циклоны обычно несут с собой подвижные атмосферные фронты. Фронтальные поверхности наклонно проходят в атмосфере, то есть это не абсолютно вертикальная стенка, где была одна воздушная масса, а потом резко началась другая. Сверху лежит теплая воздушная масса, теплый воздух которой напоздает на холодную. Исходя из простых физических свойств можно легко понять, почему ледяной дождь наблюдается

только на теплом атмосферном фронте. Это происходит потому, что выпадающие в тёплом воздухе осадки замерзают в самом низу на холодных поверхностях, то есть на автомобилях, на ветвях деревьев, которые имеют температуру ниже нуля. Выпавшие капельки находятся еще в жидком состоянии.

Длина фронтальных зон может достигать тысяч километров, ширина - десятков километров, поэтому, когда мы говорим, что над нами проходит атмосферный фронт, это не моментальное явление. Скорость фронта - приблизительно 50 км/ч (холодный фронт движется быстрее, тёплый - помедленнее из-за термодинамики), и если его протяжённость несколько десятков километров, а скорость 50 км/ч, то сам фронт будет проходить над наблюдателем приблизительно в течение часа. Высота фронтов достигает нескольких километров. Главные фронты разделяют основные географические типы воздушных масс. Арктический фронт разделяет арктический и умеренный воздух. Полярный фронт разделяет умеренный и тропический воздух. Раздел между тропическим и экваториальным воздухом не носит характер сильно выраженного фронта, но это как раз и есть внутритропическая зона конвергенции. Почему полярный и арктический фронты похожи по названию? Когда впервые был назван полярный фронт как граница между тропическими и умеренными воздушными массами, еще не было много известно о существовании арктических воздушных масс как таковых. Когда появился, соответственно, ещё и арктический воздух, то значит фронт назвали арктическим.

Приближение теплого атмосферного фронта очень легко увидеть по предшествующей облачности. В зоне первых сотен километров начинается прохождение осадков, а уже за 800 км от прохождения фронта вы можете увидеть когтеобразные перистые облака. Это самый первый признак, когда вы видите *Cirrus Uncinus*, что в 800 км по идущему потоку находится тёплый фронт. В полевой географии это знание иногда может спасти жизнь, если вам нужно осуществлять какие-либо тяжёлые переходы, например, в горах. На высоте приблизительно 5 км проходит граница ледяных ядер. Сначала вы видите перисто-слоистые облака, в них можно увидеть гало, поэтому гало является одним из основных признаков ухудшения погоды и прохождения теплого фронта. Затем высокослоистая облачность уплотняется в слоисто-дождевые облака, и идут обложные осадки. Обратите внимание, что чаще всего на теплом фронте идут обложные осадки, а не ливневые.

Холодных фронтов бывает два типа. **Холодный фронт первого рода** является зеркальным отображением облачности теплого фронта, только уже за фронтом наблюдаются перисто-слоистые, потом высокослоистые и слоисто-дождевые облака. К ним добавляется кучево-дождевая облачность, которая является одним из характерных маркеров именно холодных фронтов. Но чаще всего летом в Московской области и в Центральной России вы видите прохождение **холодного фронта второго рода**. Он более опасен и более интенсивен. Все литературные свидетельства об опасных грозах, граде, ветре, который бьёт окна и ломает ветки деревьев рассказывают, скорее всего, о

холодном фронте 2 рода, потому что он очень компактный - всего 100-150 км. Происходит моментальное развитие высокой кучево-дождевой облачности, под которой находится весь спектр неблагоприятных погодных явлений. Это ливневые осадки, грозы, град, шквалистые порывы ветра, метели зимой. Он гораздо менее протяжённый, чем холодный фронт 1 рода, а за счёт того, что вся физика та же самая, то изменение температуры приводит к изменению погодных свойств в более интенсивном виде.

**Фронт окклюзии** возникает в результате смыкания холодного и теплого атмосферного фронтов. В каждом циклоне есть и холодный, и тёплый фронт. Холодный фронт по термодинамическим характеристикам движется всегда быстрее, чем тёплый, и наступает тот неловкий момент, когда холодный фронт догоняет тёплый, и зоны облачности и осадков двух фронтов смыкаются. К продолжительности осадков теплого фронта добавляется продолжительность осадков холодного. Тепла у Земли уже не наблюдается, всё тепло уходит наверх. Если вы наблюдаете достаточно длинный по протяжённости снегопад (порядка суток), который меняет свою интенсивность, скорее всего вы наблюдаете продолжение фронта окклюзии. В системе фронта окклюзии взаимодействуют три воздушные массы: два типа холодного воздуха и тёплый, который уже не соприкасается с поверхностью Земли, то есть тепло и основные зоны соприкосновения приподняты в отличие от традиционных тёплого и холодного фронтов. Фронты окклюзии имеют сложные облачные системы, и вообще синоптическое предсказание движения именно фронта окклюзии наиболее сложное по сравнению с теплым и холодным фронтами. Иногда происходят такие интересные события, как застревание фронта окклюзии в горах, что случается на Кавказе, когда фронт долгое время не преодолевает какой-либо хребет или горную цепь и постоянно выливает осадки, находясь в предгорьях.

На фронтах и в воздушных массах по обе стороны фронтов возникают огромные атмосферные волны, которые приводят к образованию атмосферных возмущений вихревого характера - циклонов и антициклонов. С одной стороны, циклоны образуются на протяженных атмосферных фронтах, то есть на арктическом и на полярном, а с другой стороны, развившиеся циклоны начинают определять движение самих фронтов. Циклоны уравниваются областями повышенного давления, т.е. антициклонами. Циклоны и антициклоны бывают фронтальные, которые образуются на атмосферных фронтах. В основном это внетропические циклоны и антициклоны. Бывают циклоны и антициклоны и не фронтальные, к ним относятся тропические циклоны и термические циклоны, возникающие летом на суше при сильном прогреве воздуха. В этом случае нет никакого соприкосновения разных воздушных масс.

**Циклон** – это область пониженного давления (замкнутые изобары с минимальным давлением). Основные характеристики циклонов следующие:

- восходящие токи воздуха. В циклоне движение воздуха направлено от поверхности вверх, именно из-за этого вверх поднимается водяной пар, который выпадает в виде осадков.
- влажная с осадками погода. Зимой циклоны несут с собой более тёплую погоду, летом, наоборот, приносят более прохладную. Это средство возмущения текущей погоды.
- ветры направлены к центру;
- циклоны подвижны.

«Сиротские» или «европейские» зимы связаны с тем, что над Европой зимой наблюдается наибольшая повторяемость циклонических вихрей.

Первая стадия развития внетропических фронтальных циклонов – это зарождение циклона, так называемая **стадия волны**, когда климатологический фронт немного изгибается. Вторая стадия развития — это уже **молодой циклон**, в нем уже появляются характерные для циклона искривления атмосферных фронтов. Третья стадия – **окклюдование циклона**, или стадия максимального развития, когда уже есть все три фронта: тёплый, холодный и окклюзии и несколько замкнутых изобар (как правило, более 5 – в стадии волны циклон имеет только одну замкнутую изобару). Четвертая стадия — это **разрушение циклона**, когда циклон уже не имеет у себя внутри никаких термических контрастов. Всё тепло посредством окклюдования уходит вверх, и циклон становится однородным холодным образованием.

В истории было достаточное количество теорий, почему образуются и распадаются циклоны. Как только были построены первые синоптические карты, появились и теории развития циклонов — термическая теория в 1860 годах. Революционным открытием была **волновая теория**, которая до сих пор она не потеряла своей актуальности. Это норвежская школа, математический факультет Бергенского университета, и Вильям и Якоб Бьеркнес и Тур де Бергерон разработали эту теорию в 1920-е годы. Далее была развита вихревая теория и современная теория бароклинного развития, которые в общем являются развитием волновой теории. Именно появление спутниковых снимков впервые подтвердило существование атмосферных фронтов. До этого считалось, что атмосферный фронт — это воображаемая линия, которая в природе в общем-то ничем не подтверждается. Волновая теория появилась на рубеже двадцатых годов, и только с первыми спутниковыми снимками она окончательно подтвердилась.

Срок жизни циклонов - несколько дней над европейской территорией. Протяженность естественного синоптического периода, то есть периода совместного прохождения серии циклонов приблизительно 5-7 дней. Если на выходные попадает дождливая фаза, то она, скорее всего, продлится и на следующие выходные.

Есть два типа антициклонов: **подвижные** и **стационарные**. Подвижные перемещаются вместе с циклонами в их тыловой части, а стационарные наблюдаются над континентами зимой и летом. Сибирский, или Азиатский, антициклон стационарный, а антициклоны, которые радуют нас теплом и солнцем в октябре, подвижные.

**Антициклоны** — это области повышенного давления с замкнутыми изобарами и повышенным давлением в центре. Для антициклонов характерны нисходящие потоки воздуха; ясная и без осадков погода: зимой морозная, а летом жаркая; ветры направлены от центра к периферии. Иногда в октябре-ноябре наблюдаются редкие антициклоны, так называемая туманная периферия осенних антициклонов. Осенью Солнце уже не поднимается высоко над линией горизонта и не может разогреть землю до того момента, чтобы туман рассеялся.

Стадии развития антициклонов, в общем-то, те же самые, что и у циклонов. Молодой антициклон характеризуется ростом давления в центральной части. В стадии максимального развития антициклон на карте представлен максимальным количеством замкнутых изобар, и в разрушающемся антициклоне давление падает, площадь сокращается и выравнивается барическое поле. Планетарные волны распределяют циклоны и антициклоны по умеренным широтам, формируют блокирующие антициклоны. Образуюсь и надолго застревая над одними и теми же регионами, они формируют явления типа лета 2010 года на европейской территории России. **Омега-блокинг** – конструкция с двумя циклонами и антициклоном в центре, которая не движется ни к западу, ни к востоку и может стационарироваться на протяжении нескольких недель. В условиях устойчивого прогрева и ухудшения качества воздуха происходят катастрофические климатические события. Малоподвижность антициклонов вызывает засухи и в случае наличия лесных пожаров - ухудшение качества воздуха.

На главных фронтах образуется серия из 3-5 циклонов, которые перемещаются по направлению воздушных течений. Открываются все эти маленькие циклоны от центра действия атмосферы; у нас это исключительно Исландский минимум. Оттуда тянется линия **полярного климатологического фронта**, на котором может быть одновременно до 3-5 циклонов. Наибольшая повторяемость антициклонов в России зимой - на северо-западе (Калининградская область, Новая Земля) и самый крайний Восток, то есть Камчатка, куда приходят циклоны с Тихого океана. Летом наибольшая повторяемость циклонов либо в арктической зоне, либо в центре страны. В январе максимум антициклонов над Якутией и над южной Сибирью, а в июле над средней и восточной Арктикой. Серии циклонов и антициклонов имеют важное значение в межширотном обмене воздушных масс, потому что единый процесс образования и разрушения циклонов и антициклонов идет непрерывно.

# **Климатология с основами метеорологии**

Учебное пособие

Подписано в печать 24.04.21.

78 стр.

Электронное издание.

Издательство Современного технического университета

390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.

(4912) 300630, 30 08 30