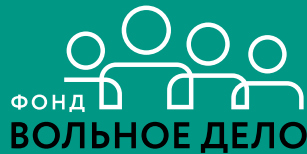




ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА



ФОНД  
ВОЛЬНОЕ ДЕЛО

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# КЛИМАТОЛОГИЯ С ОСНОВАМИ МЕТЕОРОЛОГИИ

КИСЛОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ  
КОНСТАНТИНОВ ПАВЕЛ ИГОРЕВИЧ

—  
ГЕОФАК МГУ

—  
КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН  
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ  
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ  
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.  
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ  
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ  
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,  
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,  
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ  
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА  
СТУДЕНТКУ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ  
**АРЦЫБАШЕВУ КСЕНИЮ ВЛАДИМИРОВНУ**



## Оглавление

Лекция 1.....	7
<i>Метеорология и климатология. Погода и климат.</i> .....	7
<i>Прогноз погоды (в том числе химической и биологической). Прогноз опасных явлений.</i> .....	7
<i>Изменение климата. Необходимость синтетического подхода.</i> .....	9
<i>Источники информации.</i> .....	12
<i>Суперкомпьютерное моделирование и прогноз климата.</i> .....	13
Лекция 2.....	14
<i>Газовый состав воздуха. Аэрозоли.</i> .....	14
<i>Вертикальная структура атмосферы.</i> .....	14
<i>Плотность.</i> .....	15
<i>Атмосферное давление.</i> .....	16
<i>Водяной пар. Парциальное давление. Относительная влажность.</i> .....	17
Лекция 3.....	20
<i>Распределение энергии в спектре Солнца.</i> .....	20
<i>Основы теории радиации. Спектр абсолютно черного тела. Закон Планка. Закон Стефана – Больцмана. Закон Вина.</i> .....	21
Лекция 4.....	26
<i>Мутная среда. Атмосферная радиация: пропускание, отражение, поглощение слоев.</i> <i>Прямая и рассеянная (диффузная) радиация.</i> .....	26
<i>Уравнение радиации: формула Бэра-Буге-Ламберта.</i> .....	28
<i>Излучение. Излучение поверхности Земли. Излучение молекулами газа. Окно прозрачности.</i> .....	29
<i>Уравнение Шварцшильда.</i> .....	30
<i>Альбедный и парниковый эффект.</i> .....	30
Лекция 5.....	31
<i>Светимость Солнца и солнечная активность. Солнечная постоянная.</i> .....	31
<i>Солнечная радиация (инсоляция) на ВГА. Сезонность. Зональность и сезонность как важнейшие факторы географической среды.</i> .....	33
<i>Солнечная радиация в атмосфере: суммарная радиация.</i> .....	34
Лекция 6.....	36
<i>Уравнение радиационного баланса.</i> .....	37
<i>Радиационный бюджет на ВГА и перенос энергии.</i> .....	40
Лекция 7.....	43

<i>Вода в атмосфере</i> .....	43
<i>Закон Дальтона</i> .....	44
<i>Характеристики влажности воздуха</i> .....	45
<i>Конденсация в атмосфере</i> .....	46
<i>Классификация облаков</i> .....	48
<i>Облачность</i> .....	49
<b>Лекция 8</b> .....	<b>50</b>
<i>Туманы</i> .....	50
<i>Атмосферные осадки</i> .....	52
<i>Электричество облаков и осадков</i> .....	53
<i>Снежный покров</i> .....	54
<i>Тепловой баланс земной поверхности</i> .....	54
<b>Лекция 9</b> .....	<b>57</b>
<i>Климатическая комфортность и климат города</i> .....	57
<i>Городской остров тепла</i> .....	57
<i>Метеорологическая комфортность</i> .....	61
<b>Лекция 10</b> .....	<b>64</b>
<i>Барическое поле и геострофический ветер</i> .....	64
<i>Географическое распределение давления</i> .....	66
<i>Общая циркуляция атмосферы</i> .....	68
<i>Циркуляционные системы разного масштаба. От общей циркуляции до мелкомасштабной турбулентности</i> .....	69
<b>Лекция 11</b> .....	<b>71</b>
<i>Атмосферная циркуляция</i> .....	71
<i>Циркуляция в тропиках</i> .....	72
<i>Тропические циклоны</i> .....	74
<i>Атмосферная циркуляция умеренных широт</i> .....	75
<b>Лекция 12</b> .....	<b>80</b>
<i>Циклогенез: образование циркуляционных систем синоптического масштаба</i> .....	80
<i>Мезосистемы</i> .....	81
<i>Муссоны</i> .....	84
<b>Лекция 13</b> .....	<b>88</b>
<i>Климатообразование</i> .....	88
<i>Классификация климатов Б.П. Алисова</i> .....	92

Экваториальный пояс.....	92
Субэкваториальный пояс.....	94
Тропический пояс.....	95
<b>Лекция 14.....</b>	<b>98</b>
Субтропический пояс.....	98
Умеренный пояс.....	100
Субарктический (субантарктический) пояс.....	102
Арктический (антарктический) пояс.....	103
<b>Лекция 15.....</b>	<b>105</b>
<i>Технология прогнозирования погоды.....</i>	<i>105</i>
<i>Классификация метеорологических прогнозов по заблаговременности.....</i>	<i>105</i>
<i>Численный прогноз погоды.....</i>	<i>105</i>
<i>Система данных наблюдений для начальных условий.....</i>	<i>108</i>
<i>Базы метеорологических данных: реанализы.....</i>	<i>110</i>
<b>Лекция 16.....</b>	<b>111</b>
<i>Определение понятия климат.....</i>	<i>111</i>
<i>Изменения климата за 0,5 млрд лет.....</i>	<i>113</i>
<i>Изменение климата на разных временных масштабах.....</i>	<i>114</i>
<i>Климат последних 5 миллионов лет.....</i>	<i>114</i>
<i>Изменения климата за последние 800 тысяч лет.....</i>	<i>115</i>
<b>Лекция 17.....</b>	<b>117</b>
<i>Теория изменения климата в плейстоцене и голоцене.....</i>	<i>117</i>
<i>Параметры Земли, влияющие на инсоляцию.....</i>	<i>118</i>
<b>Лекция 18.....</b>	<b>123</b>
<i>Керны Гренландии и Антарктиды.....</i>	<i>123</i>
<i>Глобальный конвейер Мирового океана.....</i>	<i>124</i>
<i>События, известные из палеогеографии.....</i>	<i>124</i>
<i>Изменения климата в последние 150 лет.....</i>	<i>126</i>
<b>Лекция 19.....</b>	<b>128</b>
<i>Изучение причин происходящих климатических изменений.....</i>	<i>128</i>
<i>Динамика климатов на разных масштабах.....</i>	<i>130</i>
<b>Лекция 20.....</b>	<b>134</b>
<i>Вариации солнечной постоянной, углекислого газа и оптической толщины атмосферы.....</i>	<i>134</i>
<i>Вулканический аэрозоль.....</i>	<i>134</i>

---

<i>Изменения климата в индустриальную эпоху</i> .....	135
<i>Моделирование изменений климата в индустриальную эпоху</i> .....	136
<i>Моделирование климата за последние 1000 лет</i> .....	137
<i>Моделирование климата XX века</i> .....	137
<i>Изменения климата на малых масштабах</i> .....	138
<b>Лекция 21</b> .....	<b>139</b>
<i>Моделирование климата XX века</i> .....	139
<i>Прогнозирование климата</i> .....	140
<i>Сценарии изменения климата</i> .....	140
<i>Географическое распределение температур и осадков</i> .....	143
<i>Международные протоколы</i> .....	144
<b>Лекция 22</b> .....	<b>145</b>
<i>Климатически обусловленные природные ресурсы: прогноз на 21 век</i> .....	145
<i>Климатическая уязвимость и риск</i> .....	148
<i>Геоинжиниринг: технологии «спасения» климата</i> .....	149
<b>Лекция 23</b> .....	<b>152</b>
<i>Сюрпризы глобального потепления</i> .....	152

# 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  $\text{Н/м}^2$  называется паскаль. В зависимости от массы, плотности и распределения атмосферы с высотой среднее давление атмосферы Земли равно  $10^5$  Па – типичное атмосферное давление. Метеорологи измеряют давление не в паскалях, а в гектопаскалях, и тогда типичное давление составляет  **$10^3$  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 встречают 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 определенные 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 эту 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 зенитном 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 удержать рост глобальной средней температуры намного ниже 2 °С и приложить усилия для ограничения роста температуры величиной 1,5 °С. 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 декларируемой 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 шестидесятих 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, альbedo 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 сжеживанию 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 сжжены 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. Второй - **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, Черапунджи, 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 наверх 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 начнется 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

$$\frac{\partial \langle c_p h T \rangle}{\partial t} \equiv \Psi = B - H - LE$$

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

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

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 альбеда 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 рождают 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 прибавляется 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°, 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. РЕТ 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  $+41^{\circ}\text{C}$  — это экстремальной стресс, ниже  $+4^{\circ}$  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 РЕТ, 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 кончиться 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 сходимостъ 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 существует 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 успеваает 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 распространен 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 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 оно не потеряла своей актуальности. Это норвежская школа, математический факультет Бергенского университета, и Вильям и Якоб Бьеркнес и Тур де Бержерон 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.

## Лекция 12

### **Циклогенез: образование циркуляционных систем синоптического масштаба.**

Из-за того, что при распределении солнечной энергии на нашей планете наилучшим образом нагреваются низкие широты, а не полюса, возникает температурный межширотный градиент в направлении полюс-экватор. На полюсе холодно, в экваториальных широтах или в тропиках гораздо теплее, и это, в свою очередь, определяет совершенно конкретный барический градиент в атмосфере. Поскольку мы работаем с таким масштабом, что сила Кориолиса играет важнейшую роль, то баланс барического градиента и силы Кориолиса определяет возникновение преимущественно западных потоков. Теоретически, эти потоки могут быть устойчивыми и неустойчивыми. Оказывается, что западный перенос в каждом полушарии гидродинамически неустойчив. Это означает, что если в нём возникает небольшое возмущение, (которые появляются все время, поскольку этот процесс квазитурбулентный), то этот маленький прообраз волны начинает разрастаться. Он увеличивается, и через некоторое время получается объект уже синоптического масштаба. Возникает волна, из которой может получиться вихрь, который будет развиваться и дальше. Таким образом, вихри и волны получают из-за неустойчивости, определяющей энергию, которая идёт на возникновение волн. Появляющиеся волны и вихри берут энергию из тех запасов, которые имеются в западном потоке. Межширотный градиент температуры определяет запасы энергии, которые идут на появление кинетической энергии атмосферных движений, сосредоточенных в циклонах и антициклонах. Для появления волн и вихрей во внетропических обязательен температурный контраст.

При образовании вихрей в тропиках работают два механизма. Первый реализуется в Атлантическом океане, и он очень похож на рассказанное выше. Западная Африка - единственное место в тропиках, где воздушные массы обладают температурными различиями. Морской воздух в тропиках — это теплый, влажный воздух, континентальный воздух – это воздух пустыни Сахары, горячий по сравнению с морским. Этот контраст температур приводит к тому, что возникает механизм гидродинамической неустойчивости, и западная Африка — это район, из которого уходят волны. Африканские волны — это такой же синоптический объект, как циклоны в Европе. Волна – структура, которая перемещается вместе с потоком с востока на запад и приходит в Карибский район. В Карибском регионе она усиливается по некоторым причинам и может достигнуть стадии депрессии и далее стадии штормов и ураганов. Американские метеорологи бьются над проблемой как можно более долгосрочного прогнозирования ураганов, которые идут на Флориду. Эту проблему никак не могут решить, потому что возможно прогнозировать только те возмущения, которые уже пришли в Карибский регион и начали превращаться в шторм. На ранней стадии, когда возмущения появляются в Африке, этот прогноз осуществить пока невозможно. Африка непрерывно генерирует возмущения, но только из очень



маленькой доли получают тропические ураганы. Дальше африканские волны пересекают Центральную Америку и уходят в Тихий океан, где тоже возникают тропические ураганы. Вышедшие из Африки атмосферные волны движутся в глубь Тихого океана и постепенно исчезают. Их амплитуда уменьшается, они становятся незаметными, хаотическими и полностью пропадают в центральной части Тихого океана. Те ураганы и штормы, которые приходят в Японию, то есть ураганы западной части Тихого океана, имеют иное происхождение. В центральной части Тихого океана довольно стохастически возникают кучево-дождевые облака, которые сливаются вместе и образуют кластеры, и они формируют движения более крупного масштаба. Каждое кучево-дождевое облако имеет диаметр около 15 километров, а их совместное влияние, связанное с выделением скрытого тепла, создает вокруг них слабую циклоническую циркуляцию. Эта циркуляция - прообраз волн, которые отсюда начинают двигаться по Тихому океану, постепенно усиливаясь и приходя к Филиппинам. Далее депрессии могут превращаться в штормы, а штормы - в тайфуны.

### **Мезосистемы.**

Атмосфера в основном нагревается снизу, поэтому воздух у поверхности получает запас плавучести и может подниматься вверх. Поднимаются вверх своеобразные частицы, которые мы можем представить как резиновую оболочку. Резиновая оболочка поднимается вверх, начинает всплывать. Это прообраз будущего облака, примерный размер которого - примерно 100-300 м. Когда эта капля поднимается вверх, она попадает в свой воздух с меньшим давлением, и поэтому она расширяется. Когда она всплывает ещё выше, она расширяется ещё больше. Предполагается, что воздух внутри этой капли не обменивается с окружающей средой. Получается, что у нас имеется изолированная частица, которая при подъеме вверх всё время расширяется, а если газовая среда расширяется, то в ней адиабатически уменьшается температура. Это известное правило термодинамики, примененное к газовой среде, которое заключается в том, что в изолированной системе температура зависит от того, происходит ли сжатие или растяжение.

Что при этом происходит с водяным паром? На стартовом положении частицы количество водяного пара зафиксировано. Оно не меняется, потому что мы предполагаем, что обмена с окружающим воздухом нет, поэтому при подъёме содержание водяного пара ( $q$  — это удельная влажность - килограмм водяного пара на килограмм воздуха) остается постоянным. Понятие насыщения можно представить в виде графика. При каждой температуре имеется своё значение водяного пара, при котором начинается конденсация. Когда частица поднимается, температура в ней уменьшается, следовательно, идёт уменьшение температуры и уменьшается  $q$  насыщенная ( $q_{\text{нас}}(t)$ ).

$$f = \frac{q}{q_{\text{нас}}(t)}$$

Если знаменатель уменьшается, то эта величина ( $q$ ) увеличивается. Это отношение есть относительная влажность. Когда частица поднимется до определённой высоты, её температура адиабатически понизится до такого значения, когда  $q$  насыщенная сравнится с  $q$ . В этом случае относительная влажность равна единице, или 100%, и начинается конденсация. Мы видим облака, потому что из пара появились капельки, которые начинают рассеивать солнечное излучение, и мы видим результат рассеяния в виде облака. Надо учесть, что для осуществления конденсации необходимы ядра конденсации, то есть те аэрозоли, на которых первоначально происходит обволакивание плёнкой водяного пара и начинается усиленный рост.

Итак, когда мы рассматриваем частицу, всплывающую вверх, температура убывает по адиабатическому закону. Величина этого убывания – константа ( $g$ , деленная на удельную теплоемкость) -  $1^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ , то есть температура в поднимающемся воздухе убывает на один градус на 100 м.

Если представить себе перемешивание, когда где-то частица всплывает, рядом – опускается, то в итоге целая область атмосферы принимает градиент температуры один градус на 100 м.

Если частица продолжает подниматься вверх, а конденсация уже началась, то при дальнейшем подъеме продолжается расширение, которое обеспечивает уменьшение температуры по-прежнему на один градус на 100 м. При этом расширение происходит теперь с выделением скрытого тепла, и это приводит к тому, что температура падает медленнее. В среднем градиент теперь равен  $0,65^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ .

Рассмотрим мезосистему, связанную с кучевыми облаками. Сначала в растущем кучевом облаке происходит подъём вверх воздуха, который адиабатически охлаждается. Внутри этого облака имеется некий ствол, главная область подъема, а в остальной части облака в основном происходит оседание воздуха. Изотерма  $0^\circ\text{C}$  изгибается внутри облака. В том месте, где идет преимущественно подъём, она поднята вверх, показывая, что теплый воздух идет вверх. Там, где идет оседание, изотерма опущена вниз, так как холодный воздух опускается вниз. Между облачной и внеоблачной средой возникают контрасты температур и плотности. Атмосфера стремится их сгладить, и этот механизм сглаживания берут на себя специальные гравитационные волны, которые обычно окружают кучево-дождевые облака. Они разбегаются в разные стороны от этого дождевого облака.

К мезосистемам относятся и кучево-дождевые облака, и кластеры кучево-дождевых облаков, и гравитационные волны, которые появляются вокруг них. Также к мезосистемам относятся так называемые местные циркуляции. Их происхождение связано с особенностями подстилающей поверхности.

**Горный ветер** в основном появляется ночью. Представим себе плато, на котором в вечернее время воздух быстро охлаждается. Холодный воздух накапливается и

начинает сваливаться вниз, потому что он более тяжёлый, и приносит вниз похолодание. Когда воздушная частица начинает опускаться вниз, она попадает в слой воздуха с большим давлением, сжимается, температура в ней адиабатически увеличивается. Однако вниз приходит холодный воздух, потому что предполагается, что наверху температура опустилась достаточно сильно, поэтому адиабатическое нагревание при оседании не может принципиально изменить ситуацию. Например, в Крыму, в Алуште, которая стоит на берегу моря, практически каждый вечер летом дует весьма неприятный холодный ветер, чего нет в Ялте, в Алушке или Симеизе. Это происходит потому, что с горы Роман-Кош начинается спускание холодного воздуха. Несмотря на то что при опускании воздух адиабатически нагревается где-то на 7-8 градусов, запасы холода так велики из-за выхолаживания, что люди внизу вполне четко ощущают похолодание.

Чтобы получился **бриз**, нужно, чтобы были суша и море. Поверхность воды и поверхность почвы обладают разными термодинамическими свойствами и из-за этого по-разному прогреваются. Днём суша прогревается более быстро. Над тёплым воздухом изобарические поверхности поднимаются таким образом, что расстояние между ними больше, чем в холодном воздухе. Возникает барический градиент по горизонтали, который вызывает движение воздуха на высоте в направлении суши. Если воздух с моря всё время уходит, то на его место приносятся другие массы, начинается подъём и образуется кольцевая структура. Днём бриз — это движение воздуха с моря, озера на сушу. В ночное время суша остывает быстро, становится более холодной, а более тёплое море остыть не успевает. Распределение давления устроено таким образом, что изобарические поверхности наклонены. Из-за этого на высотах возникает поток воздуха, и получается некая циркуляционная бризовая ячейка. Ночной бриз — это воздух, который движется с суши на море. Следует отметить, что эти циркуляции (горный ветер, бризы, фен и другие явления) очень хорошо выражены только тогда, когда отсутствуют крупные синоптические системы. Если к берегу моря пришел хороший циклон, то погода будет определяться именно им, а не бризовыми эффектами. На крупных озерах (Ладожском, Чудском) бризовые эффекты слабо выражены, потому что главную роль в формировании поля скорости ветра определяют именно циклоны и антициклоны.

Еще один пример такого рода циркуляции — это **фен**. Представим себе гору, вдоль которой начинает подниматься воздух. Этот воздушный поток состоит из частиц, где каждая частица попадает в среду с меньшим давлением, и температура адиабатически уменьшается. Наступает момент, когда температура адиабатически уменьшилась настолько, что относительная влажность равна 100% и началась конденсация, и лишняя вода из облаков выпадает в виде дождя на склоне. Дальше происходит переваливание, и поток начинает опускаться вниз. Когда воздушные частицы начинают опускаться вниз, они попадают в слой воздуха с большим давлением и сжимаются, поэтому температура в них адиабатически увеличивается. Если бы капли воды остались в этой

большой частице, не выпали бы из неё на том склоне, мы получили бы совершенно обратимое явление. Воздух поднимается, часть воды конденсируется, он охлаждается, потом на спуске при опускании температуры увеличиваются, капли испаряются, и мы приходим к той же самой температуре. Если капли выпали, то воздух приходит уже сухой. На подъеме внутри облака происходит изменение температуры по закону  $0,65^{\circ}\text{C}/100$  м. Опускание происходит в сухом воздухе, и этот воздух адиабатически нагревается по закону  $1^{\circ}\text{C}/100$  м. Получается, что на наветренном склоне температура была одна, на подветренном она оказывается совершенно другой. В некоторых случаях фены приводят к катастрофическим изменениям в температуре. Наиболее характерный пример — это **чинук**, который происходит в Скалистых горах в Соединённых Штатах. Дополнительную роль там играют ещё и особенности географии этого района. Зимой за горами на континенте температура может быть  $-15^{\circ}\text{C}$ . Здесь выражены антициклональные условия. У океана в умеренных широтах зимой может быть  $+15^{\circ}\text{C}$ . Такой воздух уже довольно тёплый, он переваливает трехкилометровый порог, при этом отдаёт всю воду и сваливается уже сухим. Он адиабатически нагревается примерно на 30 градусов, то есть реально температура может подняться на 50 градусов. При таком явлении сходит весь снежный покров, который тает или молниеносно испаряется. Вообще фен надо понимать не плавным потоком. Сверху начинают двигаться более тёплые частицы, которые вклиниваются в холодный воздух. Воздух начинает перемешиваться, в нём возникает сильная турбулизация среды, появляются гравитационные волны, то есть фен обычно сопровождается бурными процессами.

Последний пример местной циркуляции — это **бора**. Бору, фен, горный ветер относят к классу так называемых **падающих циркуляций**. Рассмотрим картину, похожую на то, что происходит около Новороссийска зимой. Туда на континент иногда приходят холодные воздушные массы, и тут может быть температура  $-20^{\circ}\text{C}$ . Этот воздух не пускает к берегу Маркотхский хребет. В это время на Чёрном море температура, например,  $+10^{\circ}\text{C}$ . Наконец накапливается так много холодного воздуха, что он начинает переваливать этот хребет, и поскольку он тяжёлый, он сваливается вниз. При этом он, конечно, адиабатически нагревается, но нагревается он очень немного, потому что высота этого хребта не дотягивает до километра. Очень холодный воздух внезапно начинает сваливаться вниз. Далее воздушные массы смешиваются, в них возникают гравитационные волны. В порывах достигаются скорости ветра больше 30 м/с, поскольку это море, то летят брызги, которые замерзают на кораблях. Если корабль находится в море, то его или переворачивает ветром, или он обмерзает и переворачивается из-за намерзшего льда. Это грозное явление простирается примерно на 20 километров.

### **Муссоны.**

В схеме общей циркуляции атмосферы вы муссонов не увидите никогда, потому что муссоны связаны с явлениями, которые при зональном осреднении сглаживаются. Распределению температуры по поверхности нашей планеты отвечают определённо

распределённые системы давления, поэтому можно говорить о термо-барическом поле. Летом Северного полушария тепло из более низких широт начинает распространяться более высокие широты, то есть происходит сдвиг термических поясов по направлению к полюсу. Вместе с ним сдвигаются и системы давления и ветра. В зимнем полушарии, наоборот, при общем похолодании системы давления и ветра сдвигаются в сторону экватора. Рассмотрим муссон на примере того, что происходит в Индийском океане. Начало июня – это лето Северного полушария, а в Южном полушарии при этом зима. В Южном полушарии существует типичная особенность под названием субтропический антициклон, и, когда наступает зима Южного полушария, этот антициклон смещается ближе к экватору. Из-за смещения к экватору воздушные частицы пересекают экватор. Вблизи экватора сила Кориолиса практически отсутствует, и воздушные частицы по инерции проскакивают экватор, потом они попадают в Северное полушарие, начинают двигаться дальше и оказываются в поле силы Кориолиса другого знака. Из-за того, что сила Кориолиса в другом полушарии направлена в другую сторону, эти воздушные частицы поворачивают, и теперь поток движется на Индостан. Этому потоку способствует то, что по периферии над Аравией, где температуры высокие, образуются слабые системы низкого давления, так называемые термические депрессии. Это самые обычные барические образования, у которых уже работает геострофический ветер. В результате ветер не проникает на Аравийский полуостров, а уходит в Индию. На Индостане тоже возникает система низкого давления, но уже из-за того, что выделяется скрытое тепло, и появляется Муссонная депрессия. Здесь выпадают осадки, а кроме того, ветер упирается в Гималаи и начинает всходить вдоль южного склона Гималаев, что приводит к дополнительным осадкам. Воздушные частицы дают много осадков, потому что они всё время движутся над тёплым океаном и Аравийским морем. Они наполняются водой почти до состояния насыщения, а потом сливают эту воду в Индии. Идёт длительный влажный период, период летнего муссона. Наступает осень в Северном полушарии, но это весна в Южном полушарии. Все термобарические системы летом начинают отодвигаться от экватора к полюсам, и антициклон также движется от экватора в сторону Южного полюса. Перетекание прекращается, и поток ослабевает и исчезает. В Северном полушарии становится не так тепло, потому что в сезонном цикле зимой потепления нет. Термические депрессии прекращают свое существование, и наступает сухой период, который называется зимнее муссонное условие. Более того, здесь уже располагаются системы высокого давления над материком, и от них происходят движения в другую сторону - зимний муссон.

Следующий пример — это Гвинейский залив. Антициклон приближается к экватору, начинается перетекание через экватор, и уже западные потоки, замещающие восточные, выходят на континент. Здесь выпадают большие осадки, но здесь нет никакой горной стены, поэтому наличие горной стены именно для муссонов необязательно. В зависимости от интенсивности муссон или глубоко, или неглубоко проникает на континент. Из-за степени этого проникновения география региона характеризуется довольно быстрой сменой условий. У побережья находятся влажные

экваториальные леса, потом влажные саванны, потом это степи, сухие степи, полупустыня и пустыня Сахара.

Говоря о сезонных явлениях, мы прежде всего вспоминаем муссон. Это всегда проявляющееся явление, его интенсивность может быть разной. Другой пример – явление, которое по продолжительности занимает от нескольких недель до месяца и находится внутри сезонного масштаба времени. Это так называемая **осцилляция Маддена-Джулиана**, и это явление сложное, которое может проявляться или не проявляться. В Индийском океане появляется скопление облаков. Если здесь происходит скопление облаков и осадков, то над Индонезией и Австралией, наоборот, наблюдается уменьшение облаков и условия, близкие к засушливости. Дальше происходит смещение этого кластера облаков, и эти области, как привязанные друг к другу пары, перемещаются на Тихий океан. После этого они становятся малозаметны, но их следы остаются в циркуляционных особенностях. Этот процесс можно представить как одиночную волну, которая перемещается как единое целое.

### **Квазидвухлетняя осцилляция.**

В стратосфере экваториальной области ветер с периодичностью около 2 лет очень четко меняет направление движения западного на восточное и с восточного на западное. Это стабильное изменение, в отличие от явления Маддена-Джулиана, которое происходит стохастически.

### **Североатлантическая осцилляция.**

Азорский антициклон и Исландский минимум – это пара вихрей, демонстрирующих синхронное поведение. Они иногда усиливаются, и тогда усиливается западный поток, а иногда они вместе ослабевают, и тогда западного потока нет. Главная мода изменчивости в Северном полушарии заключается в следующем. В положительную стадию теплые потоки идут на материк, в отрицательную стадию они идут в ослабленном виде, и зимы становятся более холодными. Все колебания зим, которые наблюдаются в последнее время, в основном связаны со знаком и интенсивностью Североатлантической осцилляции.

### **Южное колебание – явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья.**

Это явление генетически развивается в Тихом океане. Над теплым океаном развивается мощная конвекция внутритропической зоны конвергенции и происходит большое выделение скрытого тепла. Это так называемая стадия Эль-Ниньо. В стадии Ла-Нинья тёплой воды становится меньше, конвективная облачность сдвигается на Индонезийский морской континент. Между этими фазами, положительной и отрицательной, различия большие. Они переносятся на весь мир, и в каких-то местах проявляются сильные отклики. Это связано с направлением волн, которые идут из области Эль-Ниньо и Ла-Нинья, переносящие сигнал, но, с другой стороны, связано с внутренней изменчивостью, присущей каждому отдельному району. Атмосфера

Северного и Южного полушарий шумит, потому что возникают циклоны и антициклоны, и, когда в шум циклонов и антициклонов вдруг приходит сигнал Эль-Ниньо, он виден, если его амплитуда больше среднеквадратического отклонения этого шума. Явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья квазиритмические и сменяют друг друга.

**Другие изменения – это Тихоокеанская и Атлантическая осцилляции.**

Температурный режим этих огромных океанов испытывает своеобразные флуктуации. Тихий океан флуктуирует с периодом примерно 20-30 лет, его температура меняется. На эти колебания откликается климат всего земного шара. У Атлантического океана колебания несколько более продолжительные, примерно 50 лет, и во временных рядах мы видим эти пятидесятилетние изменения.

## Лекция 13

### Климатообразование.

«Климат – то, что мы ожидаем, а погода – то, что мы наблюдаем».

Марк Твен

«Погода – это принятие решения, надеть сегодня трусы или кальсоны.

Климат – это отношение трусов и кальсон в шкафу».

Чарльз Волфорт

**Климат** – это средний режим погоды в определённом месте, выявленный за многие годы наблюдений. Раньше при наблюдении за изменением климата учитывали количество времени, отпущенное на долю предыдущих поколений. Сейчас климатический отрезок ограничили тридцатью годами, поэтому классический климатический отрезок, относительно которого всегда говорили, что климат изменился за последние десятилетия, приходится на 1961-1990 годы. Это так называемый отрезок классического климата Всемирной метеорологической организации. Новым отрезком станет период с 1991 по 2020, но уже сейчас используются отрезки с 1970 по 2000 и с 1981 по 2011. Почему длительность этого периода именно 30 лет? Во-первых, это то, что можно непосредственно ощущать на времени жизни одного поколения. По разным демографическим признакам поколением сейчас считается 25 лет. Климат — это как раз то, что соответствует жизни одного поколения, и, кроме того, в эти 30 лет укладывается огромное количество колебаний, которые существуют внутри. Это колебания (в том числе Эль-Ниньо - Южное колебание), которые имеют средний период порядка нескольких лет, сюда укладывается одиннадцатилетний цикл колебаний солнечной активности. Некоторые изменчивости не укладываются в 30 лет, например, шестидесятилетние солнечные циклы, поэтому иногда климатом называют осредненное состояние по всей известной климатической информации. В Москве наблюдения ведутся с 1879 года, то есть в Москве можно говорить о климатическом периоде в 140 лет. Наиболее долгие ряды, которые существуют в Европе — это университет Сорбонны (порядка 200 лет) и Гринвичская обсерватория.

**Глобальный климат** — это состояние климатической системы, которая представляет совокупность атмосферы, океана, криосферы, где находится накопленная сотнями тысяч лет вода в замерзшем состоянии, и биосферы, потому что с изменением климата изменяются условия существования для многих земных организмов. Если говорить об опасностях происходящего процесса потепления климата, то человек адаптирован к нему в наименьшей степени. Если вы возьмете виды животных и растений, которые существуют чрезвычайно давно, можно говорить об их климатической устойчивости. Homo sapiens, как известно, не очень устойчив к климатическим колебаниям, однако он устойчивее многих наших предков. Согласно одной из гипотез, прямохождение — это



адаптация, которая была вызвана необходимостью перемещаться на большие расстояния в связи с изменениями климата. Наши ближайшие родственники в животном мире, приматы, передвигаются гораздо хуже, чем человек, потому что у них не существует необходимости покидать уже освоенный ареал.

Климатическая система складывается из внешних и внутренних процессов, приводящим к изменению климата. Климатическая система, как любая сложная система, порождает свои внутренние колебания. Многие климатические изменения, к примеру, потепление в Арктике тридцатых годов XX века, были вызваны именно внутренними процессами климатической системы. Многие процессы, которые очень хорошо заметны человеком на протяжении его жизни, являются как раз процессами колебания, которые система порождает сама внутри себя.

Источником энергии всех атмосферных процессов является солнечная радиация. Остальные источники не сравнимы по своей мощности с приходящей энергии от солнечного диска. Это практически единственный источник энергии для земной поверхности и атмосферы, даже если мы говорим локально. Понятно, что Исландия получает большое количество геотермального тепла, но, если распределить это количество тепла по всей земной поверхности, ее получится очень немного. Солнечная радиация – это солнечная постоянная чуть больше киловатта на квадратный метр.

### **Климатообразующие процессы:**

- 1) теплооборот - перераспределение тепла в атмосфере и географической оболочке;
- 2) влагооборот;
- 3) атмосферная циркуляция, которая возникает для того, чтобы помирить между собой все неравномерности, возникающие в процессах тепло- и влагооборота.

**Теплооборот** — это совокупность сложных процессов получения, переноса и потери тепла в системе «земля-атмосфера». Все тепловые балансы — это так или иначе теплооборот. Особенности процессов теплооборота наряду с суточным и сезонным ходом определяют температурный режим того или иного места. Чтобы предсказывать изменение температуры в одном конкретном месте, вам потребуется знать всё про его теплооборот: альбедо, антропогенный поток тепла и так далее.

**Влагооборот** — это постоянный оборот воды между земной поверхностью и атмосферой. Успешность моделирования и параметризации влагооборота определяется тем, насколько четко разрешается сам перенос влаги. Если учитывается только испарение, то точность низкая, если вода в подземных источниках переливается между ячейками сетки в любой климатической модели, то это уже более сложный подход. Все модели, которые показывают изменение климата на середину и конец XX века, учитывают гидрологию и влагооборот.

**Атмосферная циркуляция** — это то, что рождается в результате неоднородности нагрева и вращения Земли, потому что сила Кориолиса отклоняет все существующие циркуляции. Процессы, влияющие на формирование климата, делятся на внешние и внутренние.

Внешние процессы – это изменение притока солнечной радиации. Кроме того, к внешним процессам относятся изменение состава атмосферы, вызванное вулканическими и орогенными процессами в литосфере и притоком аэрозолей и газов из космоса, а также изменения очертаний материков, океанических бассейнов и солёности.

Внутренние процессы в климатической системе — это взаимодействие атмосферы с океаном, облачность и снежный и растительный покров.

Внешние и внутренние процессы очень легко разделять друг от друга по времени, за которое рассматривается состояние климатической системы. Если изменение очертаний материков в пределах 1000 лет — это внешний процесс, то в пределах миллионов лет он становится внутренним. Точно так же в своё время произошло изменение газового состава в нашей атмосфере, в результате которого мы с вами получили возможность развиваться как вид.

В климатической системе существуют положительные и отрицательные обратные связи. При положительной связи внешние влияния усиливаются внутренними свойствами системы. **Положительная связь усиливает, а отрицательная ослабляет причину, вызвавшую процесс.** Если увеличивается количество солнечной радиации, приходящей в экваториальные широты, то увеличивается температура приземного слоя воздуха и увеличивается количество испаряемой влаги. Влага испаряется, и увеличивается количество облачности, и температура снова понижается. Это пример отрицательной обратной связи, когда увеличение испарения позволяет внезапно выросшую температуру понизить до устойчивого значения. Пример положительной обратной связи – это связь между альбедо снежно-ледового покрова и температурой атмосферы. С увеличением количества снежников и ледников на земной поверхности уменьшается температура приземного слоя воздуха.

Возникает вопрос, как мы можем классифицировать климаты Земли, если они такие изменчивые. Из-за их изменчивости мы говорим о них в условиях среднего состояния. **Классификация климатов Алисова** является одной из основных в мировых классификациях. Она очень удобна для того, чтобы проследить изменения климата на территории России. Классификация Алисова **генетическая**, основное понятие — это воздушная масса. От преобладания нахождения воздушных масс на территории вы получаете тип климата. Существуют классификации климатов, которые являются более строгими и для которых нужно много фактической информации. Если вам нужно знать, какой климат в данной точке, вы скорее всего возьмете **классификацию Кёппена-Треварта или Кёппена-Гейгера**. Согласно ей существует несколько классов

климатов: тропические, субтропические, умеренные, субарктические, полярные и особый тип климата - сухие климаты, то есть климаты пустынных и степных регионов. По формуле можно рассчитать так называемый предел сухости, которой вычисляется как температура и пределы летних осадков.

$$ПС = 20 \cdot (t - 10^\circ + 0,3 \text{ ПЛО})$$

Картина районирования климатов по Кёппену и Треварту в принципе похожа на алисовскую классификацию, потому что большинство климатов зональные. В классификации Кёппена-Треварта существует четыре подтипа тропического климата: тропический дождливый, тропический муссонный, тропический летний дождливый, тропический зимний дождливый. Сухие климаты — это климат степи, климат пустыни и морской пустынный климат. Три субтропических климатов: субтропический дождливый, субтропический летний дождливый и субтропический зимний дождливый – средиземноморский. Два типа умеренных климатов — это морской и континентальный, два типа субарктических, климат тундры и самый холодный – это ледовый климат.

Примеры по определению принадлежности некоторых станций к сухим типам климата: Суэцкий канал - Порт-Саид: температура воздуха 22°C, летние осадки 6 мм, годовая сумма осадков 63 мм, предел сухости 298. Таким образом, Порт-Саид попадает в сухие климаты. Александрия (Египет) также относится к области сухих климатов, но с немного большим количеством осадков. Мадрид в Испании не принадлежит к сухим климатам из-за того, что имеет большую годовую сумму осадков.

Классификация климатов Кёппена-Треварта или Кёппена-Гейгера является международно унифицированной, в то время как классификация климатов Алисова больше распространена на территории России и стран бывшего Советского Союза и частично на территории Европы.

Существуют классификации климатов, которые не привязаны к четким климатологическим показателям. Это климаты, которые привязаны к ландшафтным особенностям. Согласно классификации великого отечественного географа Берга климаты подразделяются по преобладающим ландшафтам. Это климат тундры, климат тайги, или Сибирский климат, климат лесов умеренной зоны (его также называют климатом дуба), муссонный климат умеренных широт, климат степи, климат Средиземноморья, климат субтропических лесов, климат внутриматериковых пустынь умеренных широт, климат субтропических пустынь пассатной области, климат саванн или тропического лесостепья и климат влажных тропических лесов. Обратите внимание на интересную закономерность: у Кёппена с Тревартом выделялись сухие климаты, а у Берга выделяются отдельно климаты низин (отдельно внутри каждого из климатов). По преобладающим ландшафтам вы определяете действующий тип климата. Кроме того, существуют так называемые высокогорные климаты, климаты высоких

плато. К ним относятся тибетский, климат высоких степей и полупустынь, полярных ледовых плато, климат субтропических пустынь, или иранский, климат высоких саванн.

### **Классификация климатов Б.П. Алисова.**

Борис Павлович Алисов не только разработал классификацию климатов, но и основал кафедру метеорологии на географическом факультете МГУ. Основной принцип классификации очень географичен. Он генетический - по преобладающим типам воздушных масс. Москва находится в умеренном климате из-за того, что над ней преобладают умеренные воздушные массы. Воздушных масс всего четыре типа: **экваториальные, тропические, умеренные и арктические с антарктическими.** Субполюса берутся из концепции климатологических фронтов. Поскольку воздушные массы находятся в постоянном соприкосновении друг с другом, существует три климатологических фронта: арктический, полярный и внутритропическая зона конвергенции. Если бы эта картина не изменялась по временам года, то в классификации климатов Алисова субполюсов бы не существовало. Летом полярный фронт поднимается к северу, за счёт этого тепло приходит в Скандинавию. Зимой полярный фронт опускается ниже, практически до африканского побережья, и вся Европа оказывается в области умеренного воздуха. Географическое пространство между средним летним и средним зимним положением полярного фронта будет называться субтропическим климатом. Аналогичным образом формируются субарктические и субэкваториальные пояса. Грубо говоря, не существует субтропических воздушных масс. В субтропиках происходит закономерная смена с лета на зиму тропической и умеренной воздушной массы, в субарктическом – арктической и умеренной. Субэкваториальный климат является более сложным, потому что экваториальный климат не образует постоянного и непрерывного типа климата. Субполюса возникают именно из-за того, что существуют климатологические фронты, и являются средними границами раздела между ними.

Внутри каждого из поясов, согласно классификации климатов Алисова, выделяются по четыре подтипа: континентальный, океанический и два переходных - западных и восточных побережий. Западные побережья отличаются от восточных из-за различий в океанической циркуляции. Всего получается 28 подтипов климатов по классификации Алисова в каждом из полушарий. Добавьте сюда зоны высотной поясности, в которых немного нарушается классификация климатов Алисова, и получите абсолютно пеструю картину климатов.

### **Экваториальный пояс**

Основной ареал экваториального климата разрывается. Это морской континент Индонезия, Амазония и Гвинейский залив. Равномерный приход солнечной радиации в течение всего года делает погоду в экваториальном климате самой скучной, потому что в среднем один день не будет отличаться от другого. Есть некоторые очень слабые

максимумы весной и осенью, связанные с положением Солнца в зените. Удобно смотреть на климатическую диаграмму, где линиями показаны температура и относительная влажность, а столбиками – осадки. Температура в континентальном экваториальном климате практически не меняется. В Демократической Республике Конго очень маленькие амплитуды температур в течение года. Над океаном амплитуды температур около 1°C, над сушей могут быть до 5-10°C. Наблюдается некоторая неоднородность режима осадков. Осадков очень много, это один из самых влажных климатических поясов земного шара. Среднее годовое количество осадков для экватора – около 3000 мм (для сравнения, в Москве всего 700). Средний день в экваториальном климате выглядит следующим образом: ближе к полудню развивается кучево-дождевая облачность, и после полудня проливается достаточно обильный экваториальный ливень. Если вы находитесь на небольшом островке в области экваториального климата, то вечер — это время для социального общения местного населения, потому что днём жарко и душно, потом проходит ливень, а к вечеру можно пообщаться в местной расслабленной обстановке. Изменения режима давления от месяца к месяцу практически не происходит, и колебание давления внутри суток больше по абсолютной амплитуде, чем колебания от сезона к сезону. Правильным будет сказать, что сезонов в экваториальном климате практически нет. Не всегда получается проследить смену зимы на лето. Из-за экваториального и субэкваториального климата сооружения инков создавались с целью понять в условиях достаточно похожих друг на друга дней, когда необходимо начинать агроработы. Экваториальный лес постоянно влажный. Дожди идут в течение всего года, а количество видов достигает одного из своих максимумов. Из-за больших затрат тепла на испарение при максимальном радиационном балансе на всей Земле в экваториальных областях не наблюдается самых высоких температур. Средний максимум температуры -порядка 30°C, средняя температура колеблется от 24 до 28°C. 40-45-градусная жара для экваториального климата - редкое исключение, нежели правило. Облака — это основные спутники экваториального климата.

Самое мощное извержение вулкана за последнюю тысячу лет – это извержение вулкана Тамбора в Индонезии. Последствия, которые повлек за собой этот феномен — это 1816 год, который в географической и климатической литературе называется «годом без лета». Чтобы понять механику этого процесса, представьте себе мини ядерную зиму, но с той лишь разницей, что причиной послужил не взрыв ядерных зарядов, а экстремально сильное извержение вулкана в экваториальной зоне. В 1815 году произошло извержение. В течение года пепел, заброшенный в стратосферу (выше 18-19 км) равномерно распределился, и 1816 год стал одним из самых холодных за последнее тысячелетие. Наиболее характерные последствия этого похолодания — это сильные бури и наводнения в Европе, заморозки в Соединённых Штатах Америки. Короткое трех-четырёхдневное извержение привело к огромным геополитическим последствиям. В преимущественно сельскохозяйственных цивилизациях начались неурожаи, за неурожаями – голод. Наполеоновские войны только закончились, Европа была

разрушена. Весной 1817 года цены на зерно выросли в десятки раз, и голод, который привел к гибели большого количества населения, послужил началом одной из массовых волн эмиграции в Соединённые Штаты Америки. Если бы вулкан Тамбора находился не в экваториальном климате, то в атмосферу попало бы гораздо больше пепла, и последствия были бы более катастрофическими.

В океаническом экваториальном климате отсутствует сухой период, и не наблюдается абсолютно никакой разницы между периодами, когда Солнце расположено в зените и не в зените. Само слово «климат» переводится с древнегреческого как «наклон», то есть это наклон солнечных лучей к поверхности. Экваториальный климат не выделяет климатов западного и восточного побережий, потому что не образует сплошного пояса.

### **Субэкваториальный пояс**

Субэкваториальный климат также называется климатом экваториальных муссонов, потому что это первый климат, в котором появляются сухой и влажный сезоны. В течение сухого периода приходят тропические воздушные массы с севера, а в течение влажного периода приходят воздушные массы из экваториального климата.

Субэкваториальный климат характеризуется сезонной сменой воздушных масс и преобладающих воздушных течений. Одним из регионов, который находится в субэкваториальном климате, является Индия. Для этого климата характерны два максимума радиации весной и осенью, жёсткий зимний сухой сезон с практически полным отсутствием дождей, приход Индийского муссона в течение лета и достаточно высокие значения температуры. Всё, что выпадает в Москве за весь год, в Мумбаи, бывшем Бомбее, выпадает в течение июля. Максимум осадков наблюдается при океаническом муссоне, и в силу особого расположения полуострова Индостан в глобальной циркуляции атмосферы Индийский муссон занимает важное место. Всё, что мы знаем из классической литературы о субэкваториальном климате, — это «Маугли». Из четкого описания Редьярда Киплинга вы определите, что там был сухой сезон. Наступление Великой Суши, маятниковые миграции различных видов животных, Водяное Перемирие – это всё указывает нам на происхождение субэкваториального климата. Континентальный субэкваториальный климат достаточно комфортный. Это высокогорный Эквадор - столица Кито, 2800 м. Тут прохладно из-за большой высоты над уровнем моря.

Океанический субэкваториальный климат гораздо более сглаженный. Сухой сезон выражен слабее, облачность больше в течение всего года, годовая амплитуда температур меньше, чем в континентальном климате. На климатограмме Индийского океана с координатами 11°с.ш. и 93° в.д. уже нет выраженного сухого сезона, наблюдаются осадки в пределах 100 мм в месяц. В субэкваториальном климате находятся северная часть острова Мадагаскар, Андаманские острова, Филиппины. Субэкваториальный климат - один из немногих типов климата, в котором происходили активные боевые действия Второй мировой войны. Именно в субэкваториальном

климате распространены тропические циклоны и тайфуны, потому что влаги много, а температуры высокие.

Индийский муссон, как и всё в климатологии, не имеет четких временных рамок. Самая распространённая гуманитарная катастрофа для Индии — это запаздывание Индийского муссона. Засуха 2003-2004 годов произошла из-за того, что муссон опоздал на 2-2,5 недели, и в конце мая над Индией установилась солнечная погода. Муссон не прикрыл своей облачностью всю Индию. За время запаздывания муссона даже среди устойчивого населения Индии было отмечено увеличение смертности.

### **Тропический пояс**

Тропический климат не везде образует непрерывные пояса, как это делает субэкваториальный. Он прерывается в районе Гималаев, а в Южном полушарии он непрерывен. К области тропического климата относится самая жаркая Африка – Сахара, Аравийский полуостров, Мексика, южные африканские пустыни и практически вся Австралия. Для тропического пояса характерно высокое давление в течение всего года, малое количество осадков и максимальные значения суммарной радиации. Те места, где значение приходящей радиации близко к солнечной постоянной — это тропический пояс. Тропический тип характеризуется одним максимумом и одним минимумом в годовом ходе температур, после летнего и зимнего солнцестояния соответственно. Максимум приходится на июль, минимум - на январь. Средняя амплитуда годовых температур над материками может изменяться до 20°C, то есть зимы уже относительно прохладные, а лето очень жаркое, а над океанами - от 5 до 10°C.

В климате тропических пустынь максимум радиации наблюдается летом, минимум – зимой, значения радиационного баланса маленькие. Средний максимум месяца для города Гат в Ливии +35°C. Это означает, что дневные максимумы поднимаются до +45°C и выше, то есть разница между дневной и ночной температурой чрезвычайно велика. Относительная влажность очень низкая, количество осадков практически близко к нулю. На большее, чем 10-20 мм в мае, ливийская пустыня рассчитывать не может. Самые высокие температуры воздуха на земном шаре отмечаются в тропическом климате из-за минимальных затрат тепла на испарение. Континентальный тропический климат — это Сахара, Аравийские пустыни, центральные пустыни Австралии, Долина Смерти. История о том, где был максимум температур – в Долине Смерти или в Ливии, - прояснилась в 2011 году достаточно неожиданным образом. Во время операции союзных войск и сил США были захвачены архивы метеорологической службы в том числе оазиса Эль-Азизия, который расположен рядом с Триполи. Казалось бы, погода должна испытывать сильное влияние Средиземного моря. В оазисе Эль-Азизия был достигнут максимум температур + 58,6°C. На окружающих метеорологических станциях максимумы едва достигали 48°C. Обратите внимание на устройство термометра, которым проводились измерения в начале века (максимум

пришелся на 1920-е годы). Этот термометр не совсем ртутный, у него ещё существует штифт, который движется и остаётся на максимальном значении. Этот штифт занимает собой промежуток около 8°C. Официальная версия на данный момент такова, что не очень грамотный наблюдатель посмотрел не на тот краешек штифта. Сейчас абсолютный максимум - в Долине Смерти: + 56°C с небольшим. Основное погодное явление пустынь — это пыльные дьяволы. Это пыльные вихри, которые не несут никакой опасности населению. Они поднимаются на высоту 20-тиэтажного дома и крутятся вокруг небольшого центра. Человек может пройти сквозь такой вихрь, не рискуя быть унесенным. Пыльные дьяволы — это явление исключительное приземного слоя, а торнадо опускаются сверху из большого кучево-дождевого облака.

Самый комфортный для человека тип климата — это океанический тропический. Этот климат идеально подходит для человека как с точки зрения эстетического восприятия, так и физиологического. Температуры невысоки, поэтому у организма не возникает необходимости постоянно преодолевать термический стресс. Температура колеблется в пределах +25-27°C, над океаном всё время дует свежий океанический ветер. К этому климату относятся Азорские, Гавайские острова. Летом осадков поменьше, но их количество достигает 100 мм.

Большие различия в океаническом тропическом климате наблюдаются на восточных и западных побережьях материков. В Самоа в восточной части выпадает примерно 2000 мм осадков, в Кабо-Верде осадков практически нет, чуть менее 200 мм.

Тропический климат западных побережий - климат океанических пустынь. Рядом находится океан, туманы стоят за счет пассатной инверсии, но осадков нет. В пустыне Атакама в течение нескольких лет может не выпасть ни миллиметра осадков. Это самые сухие области земного шара - западная Африка, пустыня Атакама, пустыня Намиб. Над этими территориями всё время есть облачность, но нет осадков. Ловушка для туманов является одним из главных инженерных приспособлений для того, чтобы получить хоть какую-то пресную воду. Хорошая ловушка для туманов даёт порядка литра в час, осажая воду из тумана на побережье. Морские игуаны, находясь в условиях этого климата, выработали очень интересные эволюционные приспособления. Они могут пить солёную воду, в ходе чего соль естественным образом выделяется через носоглотку.

В тропическом климате восточных побережий выпадают самые обильные осадки во всём тропическом климате. Это чёткие муссоны, относительно высокие температуры воздуха, но много осадков, которые выпадают в течение года довольно равномерно. В бразильском Сальвадоре выпадает 300 мм осадков в апреле и мае. Всё время преобладает тёплый и влажный воздух с океана. Одно из явлений, которое наблюдается в тропических широтах восточных побережий, — это облачное цунами. За счёт того, что очень сильно насыщенный влагой воздух с океана вынужден преодолевать условия высотной застройки на побережье Панама-Бич, формируются антропогенно вызванные



---

туманы. Средняя природная зона полуострова Флорида - болото с огромным количеством аллигаторов. Эти места стали такими из-за тропического климата восточных побережий.

## Лекция 14

### Субтропический пояс

Субтропический пояс — это первый из поясов, в котором в зимний период появляются осадки в виде снега. Снежного покрова ещё не образуется, но снег в субтропическом поясе идёт. Количество годовой солнечной радиации на 20% меньше, чем в тропическом климате, поэтому рекордов температуры и чрезвычайно жаркой погоды летом уже не бывает. Радиационный баланс положительный в течение всего года, и это последний из южных климатов, в котором радиационный баланс положительный. Дальше он будет либо колебаться, либо вообще отрицательным, как, например, в арктическом климате. Сильно возрастают сезонные колебания температуры, и зима от лета отличается очень сильно. Из тропической метеорологии мы перенеслись в метеорологию внетропическую, поэтому далее в формировании климатов будут играть существенную роль циклонические вихри.

Континентальный субтропический климат, или климат субтропических пустынь, характеризуется жарким сухим летом и холодной и не очень влажной зимой. Летом преобладают тропические депрессии, зимой - субтропические антициклоны. В Тегеране средняя температура июля  $+29^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что средние дневные температуры летом они поднимаются до  $+40^{\circ}\text{C}$ . В январе температуры  $+2,6^{\circ}\text{C}$ , поэтому естественно снежного покрова не образуется. Осадков мало - 228 мм, что в 3 раза меньше, чем в Москве. Максимум осадков – зимой. Естественные ландшафты — это пустыни Средней Азии. Все деревья в этом типе климата могут расти только при постоянном орошении. Если хотя бы на пару дней это орошение прекратить, то всё моментально высохнет.

В субтропическом морском типе климата средняя температура июля  $+20^{\circ}\text{C}$ , средние температуры января около  $+10^{\circ}\text{C}$ . Погода комфортная и нехолодная в течение всего года. Максимум осадков, как и в континентальном климате, выпадает зимой с подходом полярного фронта.

Субтропический климат западных побережий материков мы хорошо знаем как средиземноморский. Он характеризуется жарким сухим летом, что благоприятно для организации курортов в этом регионе, и влажной зимой. Летом в средиземноморском климате преобладает континентальный тропический воздух, осадков мало, температуры высокие. Зимой наблюдается интенсивная циклоническая деятельность и большое количество осадков, потому что с подходом каждой серии циклонов с полярного фронта осадки выпадают в смешанном виде от ливневых дождей из холодного фронта до смешанных осадков в виде снега. Летом с июня по август осадков практически не наблюдается. Температуры достаточно комфортные – средние температуры поднимаются до  $+20^{\circ}\text{C}$ , максимальные в зимний период  $+10^{\circ}\text{C}$ . В Риме, который находится в средиземноморском типе климата осадков выпадает больше, чем

в Москве – 882 мм. Температура в июле  $+25^{\circ}\text{C}$ , то есть дневные температуры поднимаются до  $+35^{\circ}\text{C}$ . Температура в январе  $+7^{\circ}\text{C}$ , что теплее, чем в Тегеране, из-за того, что приходят воздушные массы с Атлантического океана. Большая часть осадков выпадает в зимний период. Единственный климат, в котором осадки в субтропиках выпадают летом – это субтропический климат восточных побережий, где осадки будут зависеть от муссона. Пример города в этом типе климата – Шанхай. Осадков здесь в больше, чем в Москве – 1144 мм, и максимум осадков – летом. Теплое и влажное лето сочетается с холодной и ясной зимой. Температура в январе  $+3^{\circ}\text{C}$ , в июле  $+27^{\circ}\text{C}$ .

Субтропический климат – тот климат, в котором появилась первая метеорологическая сеть. В 1654-1667 герцог Тосканский Леопольдо Медичи на свои деньги основал первую сеть из 10 станций, которые от Флоренции дотягивались до Парижа с Варшавой. Эта сеть просуществовала очень недолго - 13 лет, но это был прообраз той сети метеорологических станций, которая сейчас насчитывает около 40000 по всему миру. Станции были не похожи одна на другую, измерения велись в разнорядной, но тем не менее был построен обмен информацией между станциями. По истечении 13 лет сеть прекратила свое существование из-за того, что закончилось финансирование. Следующая сеть, которая была с одинаковой приборной базой, также возникла в пределах субтропического средиземноморского климата. Это так называемое **Мангеймское метеорологическое общество**, существовавшее приблизительно столько же по времени (1781-1795 гг.). Эта сеть работала в Москве и Санкт-Петербурге в течение 15 лет и распространилась даже на Урал. Также были станции в Соединённых Штатах и в Гренландии.

Зимой в муссонном климате восточной части материков чрезвычайно некомфортно из-за вторжения Сибирского антициклона. Холодный континентальный воздух попадает по периферии самого антициклона достаточно глубоко и может достигать южных Японских островов. Вообще Япония интересно именно тем, что это единственный субтропический климат, в горах которого за счёт горного рельефа может ждать до 2м.

Четкий субтропический климат в нашей стране существует только в одном месте. Это олимпийская столица Сочи и всё, что находится к востоку от неё. Переходные климаты могут наблюдаться от Новороссийска до Туапсе. По современным представлениям, что-то похожее на субтропики существует только на южном побережье Крыма за Крымскими горами. Весь остальной Крым — это умеренный пояс.

События Крымской войны происходили как раз в субтропическом климате. Важно, что это первое событие, когда потребовалось использовать в военных действиях метеорологический прогноз. Балаклавская буря, которая разметала по скалам союзную эскадру, как тогда казалось, пришла из неоткуда. По итогам этой бури Урбен Леверье из Парижской Академии наук была составлена самая первая синоптическая карта в истории. Она была составлена методом эпистолярного жанра, так как Леверье писал своим знакомым, которые обладали хотя бы любыми метеорологическими

данными. Ему пришли письма со всей Европы, и даже на первой синоптической карте можно увидеть циклон, оторвавшийся с Исландского минимума, и антициклональный гребень над Пиренейским полуостровом.

### **Умеренный пояс**

Умеренный пояс – это единственный пояс на земном шаре, в котором всё целиком и полностью зависит от циклонической деятельности. Самая неустойчивая погода наблюдается также в умеренном поясе, и самые большие контрасты температур внутри одного пояса наблюдаются, опять же, в умеренном поясе. Радиационный баланс зимой становится отрицательным. Самое главное, что влияет на весь климат умеренного пояса — это **западный перенос**. Он может нарушиться, если полностью стают арктические льды, и в этом случае климат в Великобритании и Западной Европе в зимний период станет намного холоднее.

Прощаясь с субтропиками, посмотрим их географическое расположение. В Северном полушарии субтропики — это практически большая часть территории Соединенных Штатов Америки. Климат Соединенных Штатов больше похож на климат южной Европы и, условно говоря, Турции. Также субтропики – это все острова Японии, кроме самого северного острова Хоккайдо. Граница разделения Северной и Южной Кореи проходит практически по зоне раздела климатических поясов. В этих государствах различаются не только политический строй, но и сильно различаются климаты. Северная Корея — это горная страна, в которой зимой лежит снег. Южная Корея исторически была сельскохозяйственной. В условиях объединенной Кореи всё выращивалось на юге, а промышленное производство сдвигалось к северу. В Европе граница между умеренным и субтропическим климатами приблизительно проходит по югу Франции и по Центральному массиву. В Южном полушарии в Южной Америке это небольшие страны, в том числе Уругвай; это крайний юг Африки – Кейптаун; в Австралии это Сидней, Мельбурн и частично Канберра. В Новой Зеландии к области субтропического климата относится самая развитая часть – Окленд, а Южный остров уже попадает в умеренный климат.

В умеренном климате 50-тиградусная разница между январём в Якутске январём в Лондоне не требует комментариев. В континентальном умеренном климате  $-44^{\circ}\text{C}$  - средняя температура января в Якутске, а 60-тиградусный мороз бывает в среднем каждые 5 лет. Осадков выпадает около 190 мм, что в три раза меньше, чем в Москве, и очень похоже на Тегеран из-за континентальности. Максимум осадков выпадает в летний период. Температура в июле  $+19^{\circ}\text{C}$ . Июль практически всего умеренного пояса имеет очень похожие температуры. В Лондоне средние летние температуры  $+18^{\circ}\text{C}$ , что сравнимо с Якутском. Отсутствие существенной разницы между летними температурами в умеренном поясе объясняется тем, что широты уже высокие, и мощность солнечной радиации, которая приходит уже недостаточно для того, чтобы

разогревать даже в летний период воздух в приземном слое до более высоких температур.

В умеренном океаническом климате маленькая годовая амплитуда температур, много осадков в течение всего года, максимум которых приходится на зиму, холодное лето и тёплая зима. В этом типе климата находится Торсхавн на Фарерских островах. Очень часты штормы, что также относится к Южному полушарию. Также это самые облачные районы на всём земном шаре.

В умеренном морском климате, в Лондоне, основали первый метеорологический департамент в истории. Это сделал Роберт Фицрой, генерал-губернатор Новой Зеландии. Он первым начал регулярный выпуск прогноза погоды в прессе. В то время ещё не было теории фронтогенеза, поэтому успешность прогнозов Фицроя можно оценивать на уровне 60-70%. В 1922 году была опубликована достаточно занятая книжка, которая называлась «Предсказание погоды с помощью численных методов». Так прогнозы делаются сегодня по земному шару с помощью суперкомпьютеров. Когда компьютеров не было, это виделось как создание огромной башни, которая была насыщена операторами арифмометров. Это был прообраз многоядерного процессора, где отдельным ядром является человек с самым современным на тот момент вычислительным устройством - арифмометром.

В Армении в районе объекта наследия ЮНЕСКО - монастыря Гегард – отмечается понижение зимних температур до  $-25$ -  $-30^{\circ}\text{C}$ . Подобной зимы в субтропиках быть не может, следовательно, Армения находится в умеренном климатическом поясе.

Умеренный климат восточных побережий – это муссонный климат. Так же, как и в субтропиках, муссоны чрезвычайно сильны. Муссоны дотягиваются даже до Камчатки, где наблюдается так называемая **муссонная тенденция**. Этот климат характеризуется влажным нежарким летом и холодной сухой зимой. Летом преобладает муссон с океана, выпадает большое количество осадков, температуры относительно невысокие. Лучшее время года в умеренном климате восточных побережий, если вы захотите посмотреть на Северную Корею или на Сахалин, — это начало осени. Зимой часто происходит вторжение холодного континентального воздуха с антициклона, осадки небольшие, очень холодно по сравнению с умеренным климатом западных побережий. Если сравнить Париж и Хабаровск, то температуры июля по-прежнему очень похожи. В Париже количество осадков такое же, как в Москве, максимум выпадает зимой. Температура в июле  $+18^{\circ}\text{C}$ , как в Москве, а температура в январе  $+3^{\circ}\text{C}$ , поэтому нет устойчивого снежного покрова. Устойчивый снежный покров в умеренном климате формируется в континентальной части и на восточных побережьях. В морском, океаническом климате и на западных побережьях постоянного снежного покрова нет. Хабаровск, который расположен в умеренном климате восточных побережий, обладает уверенным снежным покровом. Осадков там выпадает практически столько же, как в Москве, но максимум приходится на лето, в отличие от предыдущих рассмотренных

типов умеренного климата. Июль здесь самый тёплый по сравнению с другими типами умеренного климата: +21°C. Это происходит из-за того, что приходят очень тёплые массы с юго-восточной части северного Тихого океана. Средняя температура в январе - 22°C, поэтому похолодания до -40°C в умеренном климате восточных побережий также случаются. Тонкая грань между умеренным климатом западных побережий и умеренно-континентальным климатом приблизительно проходит по долготе Берлина. Всё, что находится западнее Берлина, — это умеренный климат западных побережий, всё, что восточнее, — это уже умеренно-континентальный климат. И Москва, и Санкт-Петербург, и даже Калининград находятся в области умеренно-континентального климата. В Калининграде влияния Балтики создает некоторую морскую тенденцию, но снег там всё равно выпадает.

В Северной Америке в умеренном климате находится Канада, северные штаты США, в том числе расположенные рядом с Великими озерами. Чикаго, Ванкувер — это умеренный климат. На востоке умеренный климат – это Пекин, Хоккайдо, Северная Корея. Также в умеренном климате находятся Фарерские острова и юг Исландии. В Южном полушарии умеренного климата очень мало. Умеренный климат Южного полушария – это небольшой кусочек Новой Зеландии и Патагония. В Новой Зеландии в равнинной части снега нет, но дуют очень сильные ветры. В Южной Америке в Патагонии и на острове Огненная Земля формируется чрезвычайно неприятный для человека климат: большое количество осадков и сильный ветер. Считается, что при путешествии на корабле «Бигль» Чарльз Дарвин отмечал, что в неприятных климатических условиях для жителей Патагонии одежда была совершенно непрактичной, так как все время промокала и не сохраняла тепло. Зимой местное население с ног до головы обмазывалось толстым слоем тюленьего жира. Люди грелись, нося с собой горячие угли, поэтому, когда европейцы впервые оказались в этом регионе, они увидели большое количество огоньков и назвали остров Огненной Землей.

Умеренный климат в Южном полушарии – это практически вся южная оконечность Южной Америки, кусочек острова Тасмания. Немного умеренный климат заходит на Антарктический полуостров.

### **Субарктический (субантарктический) пояс**

В субарктическом климате летом преобладают умеренные воздушные массы, зимой - арктические; очень маленькие величины радиационного баланса, тепло в котором тратится на таяние снега и льда в летний период. Во всём субарктическом климате зимой устанавливается снежный покров - от Исландии до Северной Америки.

В континентальном субарктическом климате очень большая амплитуда температуры. Именно в субарктике расположен полюс холода Северного полушария. И Верхоянск, и Оймякон находятся в зоне субарктического климата. Максимум осадков достигается

летом, потому что зимой осадков нет из-за влияния Азиатского антициклона. Зимой формируются ядра арктического воздуха. Лето довольно прохладное, ему соответствует короткий вегетационный период. Природная зона – тундра, лесов практически нет.

В субарктическом океаническом климате небольшая годовая амплитуда температуры, равномерное количество осадков в течение всего года, холодное лето и умеренная зима и очень интенсивная циклоническая деятельность. Наблюдается значительная облачность и частые штормы. Средняя летняя изотерма, которую нужно запомнить для субарктического климата -  $+10 - +12^{\circ}\text{C}$ . Самый крупный город субарктики – это Мурманск. В Северной Америке в области субарктического климата находятся весь Гудзонов залив, малообитаемые части Канады и большая часть Аляски. На рубеже арктического и субарктического климата находится наиболее характерный северный город Соединённых Штатов – Фэрбенкс со своим университетом.

Самая низкая зарегистрированная температура в пределах Северного полушария – это Верхоянск  $-68,9^{\circ}\text{C}$ . Она была официально измерена на метеорологической станции. Однако в Оймяконе наблюдения имеют меньшую протяжённость в течение XX века, и в тот момент, когда был измерен минимум Верхоянска, измерений в Оймяконе просто не производилось. Чисто статистически по температурам Оймякон стабильно холоднее, чем Верхоянск, поэтому есть надежное основание предполагать, чтобы если бы существовали ряды синхронных изменений в этот самый холодный день, то в Оймяконе было бы  $-72^{\circ}\text{C}$ . Это чёткий расчёт, но этого минимума никогда не было измерено вручную. Из-за близости полярного круга в Оймяконе и Верхоянске зимой света меньше, чем в Центральной Якутии, поэтому зимние температуры опускаются ниже.

### **Арктический (антарктический) пояс**

Самые холодные климаты земного шара - арктический и антарктический. Для этого климатического пояса характерен отрицательный радиационный баланс в среднем за год, большой приток радиации летом и его отсутствие зимой и чрезвычайно низкие температуры в континентальном климате Антарктиды.

Самые низкие температуры на земном шаре - станция Восток  $-89,2^{\circ}\text{C}$ . Много ясных дней, антициклон господствует круглый год. Зимой средняя температура около  $-50 - -60^{\circ}\text{C}$ .  $-30 - -25^{\circ}\text{C}$  — это стандартная летняя температура в центре Антарктиды. Одной из самых важных климатических особенностей Антарктиды и её прибрежных регионов является существование стоковых ветров. Это постоянные ветры, которые дуют из зоны антициклона сверху вниз на побережье в среднем с ураганной скоростью ветра  $35 \text{ м/с}$ . Когда Антарктида только покорялась экспедициями Амундсена и Скотта, особое внимание уделялось тому, как через эти стоковые ветры уверенно зайти на Антарктическое плато. Считается, что Амундсен более тщательно проработал именно

момент захода на ледяной щит Антарктиды. Стоковые ветры существует и в Гренландии.

Арктический континентальный климат менее суровый. Минимальная температура в Гренландии - чуть ниже  $-50^{\circ}\text{C}$ . В отличие от Антарктиды, здесь существуют постоянные поселения. Самым крупным городом в островном арктическом климате является Лонгиербюен на Шпицбергене, в континентальной части - наш северный бриллиант - Норильск с населением около 107 тысяч человек. Особый тип застройки создает ветрозащищённые двory-колодцы. Город Фэрбенкс расположен в подобных условиях. Из-за того, что он находится в долине реки Танана, там формируются огромные концентрации загрязняющих веществ. Это один из самых загрязнённых городов США. Под температурными инверсиями огромное количество автомобильных выхлопов формируют так называемые условия ледяной мглы с дальностью видимости несколько десятков метров.

Арктический океанический климат чуть более приятный. На островах российской Арктики зимой температуры порядка  $-25$  -  $-30^{\circ}\text{C}$ , а летом чуть выше нуля.



## Лекция 15

### Технология прогнозирования погоды.

Первые прогнозы погоды были мотивированы Крымской войной и катастрофой союзного флота: английского, французского, турецкого и королевства Сардиния. В районе Балаклавы, около Севастополя, десант попал в шторм, были серьёзные потери, и в итоге вторжение было отложено на месяц. За это время удалось осуществить некоторые мероприятия по укреплению обороны Севастополя. Ущерб, который был нанесен эскадре, сподвигнул руководителя Франции Наполеона III к идее, что это явление можно было бы спрогнозировать. Задача была передана во французскую Академию Наук, и ей занялся известный астроном Леверье, который подошёл к проблеме очень просто. Он взял в библиотеке газеты балканских стран, внимательно прочитал все сводки погоды в предшествующие дни и в итоге установил, что за три дня до этого события некая буря отмечалась в Адриатическом море, за два дня - где-то на Пелопоннесе, за день она была в Стамбуле, а затем пришла к Севастополю. Через какое-то время англичане стали выпускать прогнозы погоды. Руководил этим адмирал Фицрой, причём сначала эти прогнозы поразили всех своей точностью. Потом начались ошибки, которые приводили к серьёзным явлениям: гибли корабли. В итоге Фицрой застрелился.

Современные прогнозы позволяют предсказывать погоду с точностью до часов.

### Классификация метеорологических прогнозов по заблаговременности.

**Прогнозы текущей погоды и сверхкраткосрочные** прогнозы нужны, в первую очередь, для авиации. **Краткосрочные** прогнозы составляют на время до 3 суток, **среднесрочные** прогнозы до 10 суток, потом начинаются прогнозы на более длительные периоды: **внутримесячный, месячный, трёхмесячный, сезонный и прогнозы изменчивости климата**. Среднесрочный и внутримесячный прогнозы отделяет **предел предсказуемости**. Это предел детерминированной предсказуемости, так как когда мы прогнозируем что-то детерминировано, то под этим понимается то, что мы знаем погоду в данный момент времени на конкретное время и в конкретном месте. Оказывается, что детерминированно спрогнозировать погоду на срок более, чем 2-3 недели, принципиально невозможно. **Долгосрочные прогнозы** — это описание осредненных параметров, типичных для данного месяца или сезона. В долгосрочных прогнозах, заблаговременность которых превышает предел детерминированной предсказуемости, мы говорим о том, какая будет в следующем месяце или сезоне аномалия, например, что следующий месяц будет тёплым или зима будет холодной, без разбивки в деталях.

### Численный прогноз погоды.

В настоящее время все прогнозы погоды представляют собой прогноз численный или компьютерный прогноз. Представим себе, что у нас есть начальное состояние ( $X_0$ ), и в

начальный момент времени мы знаем набор метеорологических полей: давление, скорость, влажность, температуру. Зная начальное поле, мы должны провести его экстраполяцию на какое-то время вперед. В зависимости от этого времени строится классификация прогнозов: на сутки, на трое суток и так далее.

Качество прогнозов зависит, во-первых, от того, насколько хорошо мы знаем  $X_0$ , то есть исходное состояние, и, во-вторых, от того, насколько хорошо работает инструмент экстраполяции по времени. Эта экстраполяция по времени осуществляется с помощью модели атмосферы, которая подхватывает начальное состояние, потом происходит интегрирование параметров в период, и мы получаем в нужный момент времени набор метеорологических показателей. Таким образом, для того, чтобы прогноз погоды усовершенствовать и стремиться к его более высокому качеству, нужно работать по двум направлениям. Генеральное направление - как можно точнее собирать информацию об исходном состоянии.

Оказывается, что наша погода и те уравнения гидродинамики, которые описывают движение в атмосфере, эта и модельная, и реальная системы очень чувствительны к ошибкам в метеорологических полях. Стоит чуть изменить начальное поле, как итоговая траектория придёт в какое-то другое состояние. В реальности приборы обладают погрешностью, а кроме этого, неравномерно распределены по земному шару, то есть имеются какие-то промежутки, где наблюдений просто нет. Из-за этого мы всегда можем предполагать, что то, что есть в реальности, отличается от того, что мы получаем по данным измерений. Когда прогноз и реальность начинают расходиться, появляется интересный эффект, который называется **неустойчивость**. Маленькая разница на начальном этапе не гарантирует, что она сохранится при дальнейшей эволюции процесса во времени. Постепенно прогностические и реальные поля расходятся настолько далеко друг от друга, что детерминированный прогноз теряет свой смысл. До 10 теоретически мы можем что-то детерминированно спрогнозировать, а на больший промежуток времени уже нет. Надо понимать, что, например, через 20 дней атмосферная модель не нарисует какое-то диковинное поле, в котором не будет, ни циклонов, ни антициклонов. Циклоны и антициклоны будут похожи на настоящие, но они будут располагаться немного не там, где они расположены в реальности. Это очень серьёзно для детерминированного прогноза. С каждым следующим моментом времени расхождение в состоянии реальной моделируемой систем становится всё больше, и сделать точный прогноз постепенно становится невозможным.

Те уравнения, которые описывают атмосферу, представляют собой **уравнение термогидромеханики**. Эти уравнения очень сложные и аналитического решения не имеют, поэтому приходится решать их численным образом, то есть решать, используя компьютерное моделирование. Их можно примерно написать в конечно-разностном представлении:  $\frac{dT}{dt} = \frac{T^{k+1} - T^{k-1}}{2\Delta t}$ . Вместо непрерывной системы мы покрываем земной шар сеткой точек, каждой такой клеточке производится решение, и разница в значениях

от одной клеточки к другой даёт понятие о производных, а разность по времени позволяет шагами по времени идти от начального состояния к состоянию нужной заблаговременности. Таким образом, система уравнений — это уравнения непрерывные. Мы, однако, с ними ничего не можем сделать и переписываем их в конечно мерную систему, используя принципы покрытия земного шара сеткой. Чем меньше шаги этой сетки, тем ближе решение, которое получается численным образом, к тому, которое получилось бы, если бы мы решили непрерывное уравнение. Однако сделать сетку исключительно мелкой мы не можем по той простой причине, что чем сетка гуще, тем больше затраты компьютерного времени требуется на эти расчёты. Приходится все время иметь в виду какое-то отношение в числителе и знаменателе: в числителе то преимущество, которое мы хотим получить, а в знаменателе - ту цену, которую мы должны за это заплатить. Из-за этого в числителе мы бы хотели сетку сделать мелкой, а в знаменателе время расчётов становится неподъемным.

В современных лучших прогностических моделях, используемых для прогноза погоды на средние сроки, шаг сетки в глобальных моделях примерно 15 км, то есть вся сетка покрыта узлами, отстоящими друг от друга на 15 километров. Кроме этого, по вертикали атмосфера тоже разбита примерно на 40 или 50 уровней, на каждом из которых проводятся расчёты. В настоящее время сложность модели атмосферы почти совпадает со сложностью самой системы. Для того, чтобы эту модель сделать, нужны сотни человеко-лет, и именно поэтому новые модели почти не появляются, но идет добавление данных на уже существующие модели. Что значит шаг 15 километров? Это значит, что многие важные детали подстилающей поверхности мы явным образом в модели не имеем. Мы можем описать Атлантический океан, Чёрное море, крупное водохранилище, а мелкое водохранилище, озеро, долину реки, склон в горах проваливаются в эту сетку, то есть не могут быть описаны (это будут **подсеточные явления**). Климатическая модель и модель атмосферы – это вещи принципиально более грубые по сравнению с реальностью.

Итак, поскольку сетка натягивается на некоторую непрерывную среду, мы видим только то, что сетка позволяет воспроизвести, и уменьшение шага сетки – это стремление к тому, чтобы информация стала все более и более точной.

Гидродинамика, то есть движение сплошной среды, интересно устроена из-за того, что разные масштабы обмениваются энергией друг с другом. Принципиальные отличия модели от реальности начинаются на масштабах, меньших шага сетки. В реальности информация от маленьких масштабов идёт на более крупные и определенным образом ими управляет. В модели этого нет, поэтому модель принципиально искажена по сравнению с реальностью, которую она старается описывать. Нужно стараться уменьшать шаги сетки, чтобы захватывать в модель всё большее количество мелких циркуляционных системы. Ещё 20 лет назад, когда шаг сетки был не 15, а 150 км, уравнения были дополнены параметризациями, с помощью которых учитывались эффекты переходов с масштаба на масштаб. В метеорологическом моделировании

существует вечная тенденция стремления к тому, чтобы шаги сетки становились всё меньше и меньше. Это требует огромных компьютерных ресурсов, поэтому прогресс в метеорологии зависит от прогресса вычислительной техники и вычислительной математики, которая используется при решении уравнений. Каждый крупный этап развития приводил к тому, что качественно улучшалось моделирование и прогнозирование.

### **Система данных наблюдений для начальных условий.**

Начальные условия берутся из измерений. **Платформы** – это те средства, с помощью которых добывается метеорологическая информация. Это метеостанции, радиозондирование, локаторы, спутники, самолётное зондирование, буи. Мы собираем информацию, получаем **начальное поле** и прогнозируем погоду. При формировании поля мы можем, например, исключить спутники и сопоставить то, что получилось со спутниками и без них. Таким образом можно оценить качество любого вида измерений. Сейчас метеорологические наблюдения на станциях уже не являются главными. Очень большие продвижения случились, когда появились спутники, которые имели на себе приборы, способные проводить зондирование атмосферы. С помощью спутников строят профили температуры и влажности. При помощи буёв в мировом океане удалось покрыть данными наблюдений огромную часть Земли. Радиозонды – это приборы, которые выпускаются в основном на суше или с редких кораблей. Это оболочка, наполненная водородом или гелием, к которой привязывают собственно радиозонд – маленькую коробочку. Эта коробочка поднимается вверх, и она содержит в себе датчики температуры и влажности, а давление берется по определению координат объекта. Также зонд отслеживает направление и скорость ветра в каждом слое, и он с гарантией поднимается до высоты 30 км. Самолёты гражданской авиации оснастили датчиками, которые дают информацию на взлёте, на трассе и на посадке, следовательно, информация всё время собирается. Радиолокаторы в основном используются для системы сверхкраткосрочного прогноза погоды.

Каждая система наблюдений обладает своим режимом работы. Для начального поля нам нужен метод, который совместил бы все результаты измерений. Имеется связь каждого источника информации с центром, куда эти данные передаются, которая называется **телеграмма**. Производятся измерения, затем формируется телеграмма, и эта телеграмма отправляется к центру. Там она принимается, проверяется на наличие грубых ошибок, а затем данные вставляются в четырёхмерную сетку, потому что значения, близкие по времени, привязываются маленькой подгонкой интерполяции к одному моменту времени и к одной точке пространства по высоте и географическим координатам. Вся масса данных, полученная с метеостанций, радиозондов, гражданской авиации, должна быть устроена. На суперкомпьютере работает специальная программа, потому что только суперкомпьютер способен справиться с таким потоком информации. Суперкомпьютер, фильтруя определённым образом каждый вид информации, расставляет её в узлы пространственно-временной сетки и

синтезирует информацию. В итоге получается общая температура, которая наиболее полно характеризует данную точку пространства в данный момент времени. Это сложнейший технологический узел, и эта система называется **система усвоения данных - data assimilation**. Дальше, когда эти данные усвоены, то есть собраны со всех платформ и разложены по узлам пространственно-временной сетки, эта информация называется **полем первого приближения**. Через два часа после измерений в базе данных появляется поле первого приближения. В этой технологической линии человек работает на метеорологических станциях, запускает радиозонды, а всё остальное делается полностью автоматически. Роль человека заключается только в том, чтобы отлаживать эти системы, чтобы они правильно функционировали. После получения поля первого приближения можно осуществить прогноз. Получение начального поля называется **препроцессинг**, счёт по моделям называется **процесс**. Зная начальное поле, мы запускаем модель, которая делает необходимые расчёты с нужной заблаговременностью. Эта система работает непрерывно без непосредственного участия человека. В нужный момент времени модель подхватывает из базы данных поле начального приближения то, что ей нужно, и начинает считать. Затем модель сбрасывает данные, и начинает работать система интерпретации, так называемый **постпроцессинг**. То, что выходит непосредственно из модели, - рабочие файлы, которые нужно превратить в карты, разрезы, профили, таблицы, расчёты средних значений или экстремальных показателей. Дальше идёт статистический и специальный **прогноз**. Например, для авиации самое главное — это дальность видимости при посадке, высота нижней границы облаков, наличие или отсутствие особо опасных явлений, а именно гроз. Особо опасные явления более-менее прогнозируются в моделях, а дальность видимости спрогнозировать нельзя, значит, её нужно каким-то образом рассчитать. Тогда используются специально ориентированные модели, которые дают информацию специально для авиации. В синоптическом анализе и прогнозе тенденция идёт к тому, что человек там будет не нужен. Синоптик – это человек, который отвечает за прогнозирование. Он получает информацию и может её немного подправить. В большей степени синоптик занимается тем, что, получая, как правило, информацию из нескольких центров, он вырабатывает правильный результат. Дальше информация идёт обслуживание авиации, железных дорог, водного транспорта, городского хозяйства, армии и флота.

Мировые и региональные центры работают по всему миру. Москва – центр, относящийся к Всемирной метеорологической организации, а также это региональный центр, и здесь производится глобальный и региональный прогноз. В Обнинске происходит слежение за уровнем радиации и делаются все необходимые расчёты, если их надо осуществить. Известные центры — это Эксетер в Великобритании, маленький город, в котором находится Европейский центр среднесрочных прогнозов. Также сильными центрами являются Токио и Вашингтон. Центр в Южном полушарии — это Мельбурн.

Результаты прогноза на трое суток отражаются в виде **коэффициента корреляции**, то есть рассчитанная карта давления сравнивается пространственно с полученной картой. Единица — это наилучшие результаты, ноль - отсутствие корреляции. В 1981 году на трое суток корреляция составляла 80%, а сейчас она подобралась к 98%. В 1980-х качество прогнозов в Северном полушарии (коэффициент корреляции 85%) было гораздо выше, чем в Южном полушарии (70%). Потом кривые стали сходиться, и уже в конце столетия они практически слились. В восьмидесятые годы и раньше в Южном полушарии было очень мало информации, не было данных над морем. Появление буев и спутников в качестве информации по начальным данным привело к улучшению качества прогноза, которое стало одинаково в Северном и Южном полушариях. Чем больше заблаговременность, тем качество прогноза хуже. Если на трое суток коэффициент корреляции почти 98%, то на пять суток уже 90%, на 7 суток только 70%.

Лучший центр в мире по прогнозам — это Европейский центр среднесрочных прогнозов.

### **Базы метеорологических данных: реанализы.**

Когда мы говорим о базах данных, то предполагается, что это некий доступный с компьютера блок информации, как правило, глобальной, реже региональной, где данные определённым образом расставлены по известному принципу. Данные наблюдений усваиваются как поле первого приближения, происходит счёт по моделям, и получается накопление данных. Когда мы прогнозируем погоду, всё находится в развитии, модели всё время совершенствуются, системы наблюдения то включаются, то отключаются. Когда мы хотим рассчитать **реанализ**, мы берём данные наблюдений (предположим, за 50 лет), то есть те поля первого приближения, которые были сгенерированы, и дальше по одной и той же модели проводим расчёт. Таким образом, мы получаем возможность, используя одну модель, разбросать данные по всему земному шару, расставить их в каждой узел географической точки и по времени. Итак, данные реанализа отличаются от поля первого приближения тем, что версия атмосферной модели одна и та же, и этим обеспечивается однородность ряда по времени. Эти ряды составляют десятки лет и могут быть использованы для любых целей.

## Лекция 16

### Определение понятия *климат*.

Когда мы говорим о климате, мы можем охарактеризовать это понятие разными вещами. **Климат** – это среднее состояние. Климатические пояса по классификации Алисова зависят от преобладания воздушных масс. Там, где арктическая масса, климат арктический, там, где умеренная, - умеренный, где тропическая – тропический, а где экваториальная - экваториальный климат. Также существуют специально классифицированные климатические пояса, которые имеют приставку суб-: субтропический, субэкваториальный, субарктический. Они формируются в тех ситуациях, когда в один сезон одна воздушная масса покрывает данный регион, а в другое время этот регион покрывает другая воздушная масса. Первый взгляд на классификацию климатов – это среднее представление о тех погодах, которые наблюдаются в том или ином регионе.

**Климат** — это режим функционирования некоторой системы. Во-первых, предполагается, что климат — это понятие глобальное, то есть это режим, свойственный всей планете в целом. Это очень важное свойство, которое определяет генезис происходящих явлений, планетарный масштаб и позволяет применять понятие климат не только к планете Земля, но и к другим планетам, как Солнечной системы, так и экзопланетам.

Мы понимаем, что климат — это характеристика термического режима и режима увлажнения, которая определяется, в первую очередь, особенностями планетарного радиационного баланса. Затем динамичные, подвижные системы осуществляют перераспределение воздушных масс и свойств. Мы выделяем общепланетарную систему **атмосферы**. Те функции, которые атмосфера исполняет для того, чтобы формировался климат, — это альбедный эффект, парниковый эффект, эффекты, связанные с перераспределением тепла, потому что из-за особенностей нашей планеты нагреваются в первую очередь тропические широты, и тепло из тропиков должно переноситься в высокие широты. В данном случае мы подходим к формированию климата как к пониманию некоторого механизма, который состоит из определённых узлов, и каждый узел отвечает за определенные функции. Следующий блок — это **Мировой океан**. Океан осуществляет обогащение атмосферы водяным паром, потому что с него происходит испарение. Также он производит межширотный перенос, осуществляемый вихрями, которые складываются в течения, в такие как Гольфстрим, Кuroсио, Североатлантическое течение. Еще одно важное свойство океана — это газообмен, то есть обмен углекислым газом между атмосферой и океаном. Океан — это одно из самых инерционных звеньев в климатической системе. **Криосфера**, с одной стороны, представляет собой продукт климата, с другой стороны, она представляет собой фактор климатических изменений в формировании климата. На протяжении очень длительного времени были эпохи, когда криосферы в современном её понимании

на Земле не существовало, потому что температуры были высокие. По некоторым причинам происходило снижение температуры, и когда оно достигало определенного уровня, то вот в этот момент появлялась криосфера. В высоких широтах появлялся снежный покров, ледники в горах, морские льды. Если температура дальше понижалась, то это явление захватывало новые территории. Затем наступал момент, когда количественное увеличение площади криосферы создавало новый качественный механизм. Приращение площади криосферы приводит к тому, что увеличивается в планетарное альbedo. Из-за этого в систему поступает меньше солнечной радиации. Таким образом радиационный баланс уменьшается, а значит, снижается температура. А если снижается температура, то создаются благоприятные условия для дальнейшего разрастания снежного покрова. Возникает обратная связь, и всё повторяется снова. Обратная связь — это широко распространенное явление в разных динамических системах. Данная обратная связь является положительной, то есть в процессе работы сигнал сам себя усиливает. Альбедная обратная связь называется так, потому что через изменение альbedo происходит влияние на температуру и климат. Процесс роста криосферы остановится, когда вся Земля покроется снегом и льдом. Однако на земном шаре никогда не было такого явления, чтобы Земля превращалась в такого рода снежок. Этот факт говорит о том, что кроме обратной связи существуют и другие контуры внутреннего взаимодействия, которые не позволяют границе снега и льда распространяться слишком далеко. Изменение температуры на земном шаре в первую очередь говорит о ее уменьшении в полярных областях. Это значит, что увеличивается разность температур в тропиках и полярных широтах. В ответ на увеличение различия температур увеличивается градиент давления, что усиливает циклогенез, из-за которого увеличивается перенос тепла в высокие широты. Это и подавляет прирост снежного покрова. Таким образом, криосфера — это и продукт климата, и фактор климатообразования, в этом случае главную роль играет альбедная обратная связь. Криосферу мы понимаем как объект, который состоит из морского льда, снежного покрова, многолетней мерзлоты, горных ледников и, наконец, планетарных ледниковых щитов, то есть в современном климате Гренландии и Антарктиды. Каждый из этих компонентов криосферы обладает своими свойствами, в частности, своей инерционностью. Изменения снежного покрова очень хорошо следуют за температурными изменениями в сезонном цикле, а чтобы изменить ледниковые щиты, нужны очень серьезные и длительные изменения температуры. Океан и суша участвуют в тепловом балансе и во взаимодействии с атмосферой. Растительность на суше своей мозаичностью создает изменения альbedo и участвует в биохимическом синтезе углерода. **Биота** — еще один фактор, который меняет содержание углекислого газа в атмосфере. За границей обычно вместо слова биота используют термин биосфера. Биосфера — это синтез живых организмов и окружающей среды, то есть биосфера чем-то напоминает климатическую систему.

**Климат** — это глобальный режим функционирования климатической системы. Её элементы глобальные, они работают на всём земном шаре в целом и находятся под



влиянием внешних факторов. К внешним факторам относится Солнце, потому что процессы, происходящие на Земле, никак не влияют на Солнце. Внешним фактором является вращение Земли с определенной угловой скоростью. Этот фактор многое определяет в динамике атмосферы и океана, в режиме дня и ночи. Сама наша планета движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. Параметры этого эллипса и положение Земли на орбите — это тоже внешние факторы. Всё это создает фон, на котором развиваются многочисленные обратные связи, определяющие то, что мы считаем климатом.

### **Изменения климата за 0,5 млрд лет.**

Климат характеризуется изменениями на всех временных масштабах, причём изменения происходят одновременно. Мы имеем синтез различных процессов, которые действуют одновременно, но каждый процесс действует в своем временном интервале. С точки зрения климатологии как науки мы почти ничего не знаем о том, что находится за пределами интервала времени 0,5 млрд лет, то есть в докембрии. За полмиллиарда лет температура на Земле менялась мало, если иметь в виду абсолютное значение. Размах составляет максимум  $10^{\circ}\text{C}$ , а амплитуда, то есть половина размаха, - всего  $5^{\circ}\text{C}$ . За это время происходили колоссальные изменения: менялся лик Земли, континенты сходились вместе и разъезжались в разные стороны, менялся газовый состав атмосферы, происходили эпохи горообразования, наконец, появилась жизнь. Несмотря на всё это, изменения температуры сравнительно невелики. Чтобы объяснить маленькие абсолютные отклонения, была придумана концепция, которая, вообще говоря, не подтверждается в полном смысле слова. Если задуматься о том, почему климат не менялся колоссальным образом, то можно сказать о том, что жизнь на планете Земля, образовавшись примерно 4 млрд лет назад, ни разу не прерывалась. Понимание того, что жизнь не прерывалась и что изменения температуры были сравнительно маленькие, привело к концепции Геи и концепции планетарного гомеостаза. Предположим, что происходят изменения внешних факторов, например, изменился парниковый эффект, когда в атмосферу накачалось очень много углекислого газа, или материки расположились по-другому и загородили океанские течения. Изменения внешних факторов приводят к изменению климата и окружающей среды. Если эти изменения оказываются неблагоприятны для биоты, считается, что биота может сгенерировать такие обратные связи, которые восстановят то состояние окружающей среды, которое благоприятствует жизни. Возникает мысль, что жизнь сама себя поддерживает, меняя на планетарном уровне свойства окружающей среды. Это и называется планетарный гомеостаз. Как ведущий процесс на масштабах десятки миллионов работала глобальная тектоника, потому что эпохи бурного горообразования сопровождались выбросом в атмосферу углекислого газа. Его содержание в атмосфере превышало современное в 10 раз, а то и в 20 раз. Движениями земной коры карбонаты вовлекались в мантию и переплавлялись там, и затем углекислый газ снова поднимался в атмосферу. Эпохи горообразования и сменявшие их

стагнации были управляющим механизмом на масштабах времени в десятки и сотни миллионов лет. От 50 миллионов лет назад до современной эпохи содержание углекислого газа в атмосфере уменьшалось. В это время, 50-20 млн лет, точно также происходило уменьшение температуры. Изменение температуры было связано именно с тем, что сначала накопилось много  $\text{CO}_2$ , постепенно его количество в атмосфере снижалось, парниковый эффект ослабевал, и вслед за этим убывала температура. Когда уровень  $\text{CO}_2$  и температура опустились ниже определенного предела, в высоких широтах стал появляться и уже не таять снежный покров, который стал накапливаться в виде Антарктического ледникового щита. К этому времени Антарктида как континент уже находилась на Южном полюсе. Дальнейшее понижение углекислого газа привело к достижению следующего критического уровня, при котором в Гренландии сформировался ледниковый щит. Это произошло примерно 5 миллионов лет назад. Дальше уровень  $\text{CO}_2$  оставался приблизительно на прежнем уровне до фактически современной эпохи, и этот уровень носит специальное название: **доиндустриальный уровень**. В современную эпоху начался бурный рост содержания углекислого газа в атмосфере от доиндустриального уровня.

### **Изменение климата на разных временных масштабах.**

Физика изменений климата своя на каждом в масштабе времени. На геологическом масштабе времени глобальная тектоника управляет содержанием углекислого газа в атмосфере. Физический процесс формирования климата в каком-то смысле очень простой и подчиненный геологии. Обратимся к самой древней эпохе – архейской. Все геологи утверждают, что это была теплая эпоха, но астрофизики говорят, что Солнце в это время светило на 20% слабее, чем в современную эпоху. Это называется **парадокс молодого Солнца**. Объяснение заключается в том, что в то время содержание  $\text{CO}_2$  было гораздо выше, чем в современную эпоху, и атмосфера была не кислородной и азотной, а в основном состояла из углекислого газа. Этого превышения хватало не только на то, чтобы компенсировать сниженное свечение Солнца, но и поднять температуру до достаточно высокого уровня. На масштабах времени не миллионов, а тысяч и десятков тысяч лет от состояния климата зависит содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере. За последние 10 тысяч лет содержание углекислого газа почти не менялось, кроме последних 100 лет. Начиная примерно с 70 млн лет назад в кайнозойскую эру происходило понижение температуры, и в зависимости от наших знаний мы можем с разной степенью детальности посмотреть на разные участки этой эпохи. Сравнительно недавно, 10 лет назад, появилось детальное представление о состоянии климата за последние 5 миллионов лет. Чем более детальный процесс мы хотим увидеть, тем ближе нам надо подойти к современному времени.

### **Климат последних 5 миллионов лет.**

Рассмотрим интервал от 5 млн лет до настоящего времени. Климатические данные были получены путем интерпретации данных глубоководного бурения донных отложений в Мировом океане, где, по мнению геологов, было тектонически спокойно.

В течение последних 5 млн лет температура снижалась, то есть продолжался тот процесс, который развивался в течение всей кайнозойской эры. Это происходило потому, что уменьшалось содержание  $\text{CO}_2$ , так как после последней эпохи горообразования происходило его постепенное удаление из атмосферы. По мнению геологов, которые занимаются планетарными проблемами, это уменьшение  $\text{CO}_2$  может означать две вещи: что через какое-то время будет новый всплеск тектонической активности или что тектоническая активность на планете Земля затухает. Помимо уменьшения температуры, амплитуда ее колебаний разная. В начале периода она гораздо меньше, чем в конце. Одна из разумных концепций, объясняющих это явление, заключается в том, что свою роль играет альбедная обратная связь. Постепенное уменьшение температуры привело к тому, что появилась криосфера, которая начала усиливать похолодание и сделала более яркой разницу тёплых и холодных этапов. Также период колебаний в конце рассматриваемого периода больше, чем в его начале. Примерно с 5 до 3 млн лет назад преобладали колебания с периодом 41 000 лет. Этот период был установлен астрономической теорией колебаний климата, и тот факт, что это удастся обнаружить в эмпирических данных, представляется очень важным. Затем не только температура понижалась и ее амплитуда росла, но и происходило изменение частоты колебаний. Вместо преобладания колебаний с периодом в 41 000 лет в последний миллион лет стали появляться колебания с периодом 100 000 лет. Время, когда колебания происходили с периодом 41 000 лет, в мировом сообществе называли «мир 41», а состояние, когда колебания происходили с периодом 100 000 лет – «мир 100».

### **Изменения климата за последние 800 тысяч лет.**

Далее обратим внимание на последние 800 000 лет. В это время температура флуктуировала от высоких значений к низким с периодичностью в 100 000 лет. Колебания имели вид подъемов и опусканий, и они называются **релаксационными**. За этот период было несколько теплых событий, и мы живем в одном из них. Это тёплое событие называется **голоцен**. До него примерно миллион лет назад был плейстоцен. Другая классификация заключается в том, что мы обращаемся к первоисточнику информации, которым являются результаты, полученные на основе изотопного анализа. По морским изотопным данным установлены изменения климата. Учитывая это, мы живём в **первой морской изотопной стадии (MIS)**. Двадцать тысяч лет назад было холодное событие, или вторая изотопная стадия. По классификации все чётные стадии – холодные, все нечётные – тёплые. В холодные стадии в высоких широтах развивалось дополнительное оледенение. Мы живём в **межледниковье**. У всех межледниковий примерно одинаковая продолжительность – около 10 000 лет. По определению и уточнению границ, голоцен начался 11 000 лет назад, то есть тёплое событие длится уже 11 000 лет, и, если принять во внимание предыдущие аналоги, скоро закончится. Мы можем уверенно прогнозировать, что скоро наступит новый ледниковый период. Подчеркнем, что физика явлений разная в разных масштабах

времени. На масштабе в десятки тысяч лет скоро наступит ледниковый период, но на масштабах времени в десятки лет скоро наступит ещё большее потепление, чем мы имеем в настоящую эпоху.

Особенно хорошо восстановлено предыдущее теплое событие как аналог современного, что важно в прогностических целях. Позднее плейстоценовое похолодание (MIS2) также восстановлено. Дополнительно к Гренландии появились новые ледниковые щиты: Скандинавский, Лаврентийский, южная граница которого располагалась ниже современных Великих американских озер. К нему примыкал Кордильерский ледниковый щит. Более мелкие щиты – Баренцево-Карский, Британо-Ирландский; Исландия также была покрыта льдом. Морские льды тоже занимали большую территорию, чем в современную эпоху. В пик оледенения уровень Мирового океана был самый низкий и по сравнению с современным был ниже на 100 м. Таким образом, лёд, который накапливался в ледниковых щитах, происходил из той воды, которая была изъята из Мирового океана. Границы оледенений были установлены по геоморфологическим признакам: по моренным валам. Следовательно, мы можем оконтурить на земном шаре области, в которых располагался ледник. Если взять воду, которая изымалась со всего Мирового океана, и разделить эти 100 м воды между Европой и Америкой, то таким образом получатся не только площади ледниковых щитов, но и их объемы. Ледниковые щиты достигали максимальной высоты примерно 2,5-3 км, что практически эквивалентно современному ледниковому щиту Антарктиды. Если посмотреть внимательно на Лаврентийский ледниковый щит, то можно представить, что разные части этого ледникового щита располагались на огромном расстоянии друг от друга. Динамика разных лопастей этого ледника может происходить независимо одна от другой. В одной части он может наступать, в другой – отступать. Каждая лопасть ледников обладала своей эволюцией, но всё-таки максимальная стадия приходится у всех ледников примерно на одно и то же время и совпадает. Это время с низким уровнем Мирового океана. Уровень CO<sub>2</sub> в атмосфере также был снижен. Все начало меняться, начиная примерно с 18 000 лет назад. Содержание CO<sub>2</sub> растёт, ледники тают, уровень Мирового океана стремительно поднимается вверх, и Земля переходит к межледниковью. 10 000 лет – то время, с которого начинается голоцен.

## Лекция 17

### Теория изменения климата в плейстоцене и голоцене.

Мы рассматриваем с увеличивающейся детализацией временные серии, которые доступны нашему анализу. Каждая следующая серия, если преобразовать её по масштабу и частоте, должна обладать теми же самыми вероятностными свойствами, что и все остальные выборки. Обычно это является следствием единого физического механизма, который работает на всех масштабах и увязывает их между собой, и то, что при этом получается, называется фракталом. В нашем случае фрактальный подход может быть вполне уместен, но на каждом иерархическом уровне физика процессов разная, поэтому считать, что мы работаем с одним и тем же процессом, по сути, было бы неправильно. На масштабах времени в десятки миллионов лет климат меняется просто за счёт тектонических причин из-за того, что в атмосферу периодически выбрасывается очень много  $\text{CO}_2$ , который потом постепенно удаляется из атмосферы. На другом масштабе происходит смена тёплых и холодных событий. Каждое тёплое событие — это межледниковье, холодное событие - ледниковое событие, которое сопровождалось оледенением. Межледниковое событие нам хорошо знакомо, потому что мы в нём живем, и мы представляем себе состояние среды, которая нас окружает. В холодное событие появляются дополнительные ледниковые щиты в Северном полушарии: Лаврентийский, Кордильерский, Скандинавский и другие. **Максимум оледенения** приходится примерно от 19 000 лет до 26 000 лет назад. Этот период называют **LGM - last glacial maximum**. В это время была самая низкая позиция уровня Мирового океана, то есть было изъято максимальное количество воды, которая пошла на формирование дополнительных ледниковых щитов и на усиление щитов Антарктиды и Гренландии. Отдельные лопасти ледника могли жить своей жизнью, и стадии максимального развития у них приходились на разные интервалы времени, но в целом пиковая ситуация приходилась на тот же период минимума уровня океана. Те районы мира, которая относятся к мелким областям Мирового океана, стали сушей. В районе современного Берингова пролива и окружающего региона была суша, которую палеогеографы называли Берингия. Берингия как зона перигляциального ландшафта существовала тысячи лет, а потом при следующем потеплении климата снова залилась океаном. Если говорить о растительности, то в голоцене на севере Евразии существует кусочек тундры, южнее находится тайга и широколиственные леса, дальше – степь. В этих же регионах во время пиковой ситуации оледенения вместо довольно сложной структуры образовались однообразные ландшафты тундростепи, которые переходили где-то далеко на юге во влажные степи. Зона лесной растительности была сжата в отдельные фрагменты и в большей степени была приурочена к особенностям рельефа. Во время этого похолодания произошло очень сильное упрощение ландшафтной структуры. На огромных территориях Европы, Азии и Северной Америки леса как планетарное явление исчезли. В тропических районах зона сухих степей и зона саванн простиралась гораздо дальше к югу, а влажные тропические леса сохранились только

фрагментарно, там, где выпадали большие осадки на наветренных склонах в горах: в Гималаях, на горе Камерун. Таким образом, в холодное событие происходило распространение ледникового покрова, снижение уровня океана, выход на поверхность шельфовых частей с небольшими глубинами, изменение ландшафта и общая тенденция к засушливости. Более тёплое планетарное событие характеризовалось более высоким уровнем увлажнения в целом по земному шару. Физика этого явления заключается в том, что в тёплом воздухе может содержаться больше водяного пара.

### **Параметры Земли, влияющие на инсоляцию.**

Важную роль в процессе смены холодных и теплых событий играет инсоляция. Инсоляция представляет собой произведение солнечной постоянной на два множителя: текущее расстояние до Солнца, деленное на среднее расстояние, и синус угла высоты Солнца.

$$I' = I_0 \left( \frac{l}{l_0} \right)^2 \sin h_z$$

Было давно установлено, что высота Солнца определяется астрономическими параметрами:

#### **1) эксцентриситет орбиты (e)**

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Если бы орбита была круглая, то эксцентриситет был бы равен нулю.

#### **2) долгота перигелия ( $\varpi$ )**

Перигелий — это точка на орбите, когда наша планета максимально близко расположена к Солнцу. Противоположная точка называется афелий. Параметр — это положение долготы перигелия.

#### **3) наклон или наклонение ( $\varepsilon$ )**

Наша планета движется в некоторой плоскости вокруг Солнца, но она движется несколько наклоненным образом. Угол наклона отличен от нуля, и он, оказывается, играет очень важную роль. Величина  $\varepsilon$  — это угол между точкой плоскости, в которой расположена орбита, и плоскостью, к которой перпендикулярна ось вращения Земли. Ось вращения Земли перпендикулярна плоскости экватора, и получается, что плоскость экватора и плоскость орбиты не совпадают. Между ними имеется двугранный угол, который равен  $23^\circ 26'$ . Если  $\varepsilon$  равен нулю, чисто геометрически максимально освещается экватор, хорошо освещаются тропики, а на точки полюсов солнечный свет практически не приходит. Как бы планета ни поворачивалась, изменений в распределении инсоляции не будет, то есть не будет сезонов. Такая ситуация

наблюдается, например, у планеты Венера. На Земле летом Северного полушария хорошо освещен экватор, весьма неплохо освещены тропики, но в Южном полушарии в высокие широты солнечный свет вообще не попадает. Через полгода прекрасно освещено Южное полушарие, неплохо тропики, но в Северном полушарии солнечная радиация не приносит энергию в высокие широты. Сезонность определяет величина  $\varepsilon$ , которая отлична от нуля. У Марса  $\varepsilon=25^\circ$ , и сезонность выражена ещё лучше, потому что чем больше наклонение, тем резче разница между зимой и летом. У Урана наклонение практически  $90^\circ$ , то есть эта планета оборачивается разными полюсами к Солнцу. Формула инсоляции применяется, если надо рассчитать поток солнечной энергии. Величины  $e$ ,  $\omega$ ,  $\varepsilon$  воспринимаются как константы, но на самом деле они испытывают очень медленные изменения. Это было выяснено путем анализа уравнений небесной механики, и были установлены некоторые зависимости. Бывают эпохи, когда эксцентриситет очень близок к нулю. В современную эпоху эксцентриситет очень маленький, и орбита Земли практически круговая. Бывают эпохи, когда эксцентриситет увеличивается, но отклонения от круга небольшие. Изменения происходят с периодичностью в 100 000 лет. Мы имеем чёткие столетичные колебания климата, и в астрономических факторах, управляющих приходом радиации, мы тоже видим столетичные колебания. Когда это совпадение было обнаружено, то сразу подумали, что эксцентриситет влияет на изменение климата. Однако изменения вытянутости и сжатости орбиты такие маленькие, что они никак не могут давать сигнал нужного размера. Наклонение флуктуирует в пределах от  $22,5$  до  $24^\circ$  с периодичностью в 41 000 лет. На протяжении нескольких миллионов лет существовал «мир 41», то есть изменение наклона тогда играло основную роль. Как мы уже убедились, сезонность на Земле определяется наклоном. Если мы делим орбиту на зоны, которые принадлежат к лету и зиме, то мы можем определить, в каком положении с точки зрения сезонности расположена самая близкая к Солнцу точка орбиты. Долгота перигелия достигается в начале января, поэтому астрономически условия зимы несколько сглаживаются. В летнее время Земля максимально удалена от Солнца. Изменения долготы перигелия происходят с периодом около 20 000 лет. 10 000 лет назад точка перигелия достигалась летом, а афелия – зимой. Таким образом, сама Земля немного покачивается, определяя контрастность в сезонах, меняется положение перигелия и афелия, сама орбита немного растягивается в эллипсе или сжимается обратно в круг. Все это определяет изменения инсоляции, что приводило к изменению климата на масштабах в тысячи лет. Увеличение  $\varepsilon$  и  $\omega$  приведет к тому, что лето Северного полушария станет более тёплым, зима станет более холодной, и, наоборот, при уменьшении наклона и долготы перигелия лето станет более прохладным, а зима - более теплой. В итоге меняется не приток энергии к планете за год, а происходит ее перераспределение от зимы к лету. В среднем за год приход радиации не меняется, потому что эксцентриситет очень маленький.

Когда астрономические данные ввели в модели климата и провели расчеты, оказалось, летние условия являются главными в том смысле, что они определяют среднегодовые изменения температуры. Здесь нельзя ориентироваться только на астрономический сигнал, надо еще смотреть на обратные связи, которые работают внутри климатической системы. Пусть за тысячи лет климат переходит к состоянию влияния увеличенного наклонения и долготы перигелия. Это обуславливает повышенный приток радиации к Северному полушарию, и температура увеличивается. Если за счёт астрономических причин увеличилась инсоляция, то за счёт увеличения инсоляции увеличилась температура. В более теплых условиях водяной пар может в большей степени накопиться в воздухе. Из-за этого усиливается парниковый эффект, а за счёт него растет температура. Зимой действуют те же самые астрономические причины, и происходит уменьшение температуры. Однако ослабления парникового эффекта практически не происходит, поэтому зимние температуры почти не чувствуют влияния астрономических факторов. Получается, что летний сигнал более важный и, глядя на его изменение, мы судим о том, как происходят изменения на планете в целом. В отдельные эпохи астрономическое влияние сильно меняет температуру, но главную роль играет обратная связь, которая запускается астрономическими причинами. В конце семидесятых годов была опубликована статья, в которой авторы этой концепции назвали это астрономическое влияние метрономом. Этот метроном запускает динамику обратных связей в климатической системе.

Еще одна обратная связь возникает между температурой и углекислым газом. Данные реконструкции климата — это не только донные отложения, но и ледяные керны, из фрагментов которых анализируется воздух, вмёрзший в него на стадии формирования льда. По данным о дейтерии восстанавливается температура, измеряется концентрация углекислого газа и другие интересные вещи. Изменения  $\text{CO}_2$  происходят очень синхронным образом; меняется и температура. На масштабах в десятки тысяч лет источников углекислого газа типа тектоники, которые создавали эти эффекты, нет. Речь может идти о том, что изменение климата каким-то образом влияет на свойства глобального биогеохимического цикла углерода. Предположим, что происходит снижение температуры. Чем ниже температура в Мировом океане, тем больше способность углекислого газа растворяться в воде. Это приводит к тому, что океан начинает отсасывать из атмосферы углекислый газ, и содержание атмосферного  $\text{CO}_2$  снижается. Когда происходит общее похолодание, то вместо мощного пояса тайги и широколиственных лесов возникает тундростепь с меньшими запасами и производством биомассы. Эта природная зона потребляет меньше углекислого газа из атмосферы, и из-за этого содержание атмосферного  $\text{CO}_2$  увеличивается. Из-за аридизации климата в холодную эпоху увеличивается вынос пыли в океан. Пыль содержит в себе ионы металлов, в частности железа, и эти ионы попадают в Мировой океан. Попадание ионов железа и других металлов в океан способствует интенсификации жизнедеятельности фитопланктона в верхних слоях. Фитопланктон фотосинтезирует, то есть в ответ на поступление фотосинтетически активной радиации



фитопланктон начинает всасывать содержащийся в воде углерод. Концентрация углерода уменьшается, и это вызывает его дополнительное выделение из атмосферы. Таким образом, этот процесс тоже снижает содержание атмосферного  $\text{CO}_2$ . В дальнейшем фитопланктон отмирает, опускается на дно и формирует донные отложения. В ответ на снижение температуры происходит снижение содержания углекислого газа, а в ответ на это происходит ослабление парникового эффекта и дальнейшее уменьшение температуры. При повышении температуры процесс идёт в другую сторону, то есть действительно получается, что на масштабах времени тысяч и десятков тысяч лет  $\text{CO}_2$  как часть биохимического цикла и климат очень четко и согласованно работают. Именно поэтому мы включаем биогеохимические циклы и биоту во внутреннюю климатическую систему. В итоге, в теории климата плейстоцена мы должны рассматривать внешние факторы, то есть астрономическое влияние, которое происходит через инсоляцию, и обратные связи, которые развиваются в системе. Именно обратные связи создают главную амплитуду колебаний, но сама возможность появления эффекта определяется изменениями инсоляции.

При приближении к нашему времени резко увеличивалась контрастность между зимой и летом. Лето становилось более тёплым, что было признаком того, что климат был теплее и в целом за год. Астрономический максимум был достигнут около 10 000 лет назад, а после этого аномалия к нашему времени начинает снова убывать. Это говорит о том, что время межледниковья заканчивается. В середине голоцена в Северном полушарии в летнее время температуры были выше, чем современные, на  $1,5-2^\circ\text{C}$ . Зимой температуры были несколько ниже. В умеренных широтах летом температура была повышена, а в Индии, в приэкваториальном поясе Африки температура была немного снижена. Это произошло из-за того, что в этих областях увеличились затраты тепла на испарение. В середине голоцена произошла интенсификация муссонной циркуляции. В ответ на усиление тропических муссонов произошло дополнительное увлажнение той части континента, куда раньше эта вода или не доходила, или доходила в маленькой степени. Оказывается, что в ответ на астрономические причины муссон активизировался и стал проникать глубже, то есть вместо пустыни Сахары была сухая степь. На самом деле, каждое межледниковье отличалось тем, что пустыня Сахара зеленела, а в каждое новое холодное событие увеличивалась аридизация. Это феномен, который никак не удастся объяснить с точки зрения моделирования климата.

Посмотрим на то, что происходило не только в голоцене, но и в прилегающий холодный период. Он, оказывается, был совершенно нестабильным, в нём происходили короткие всплески повышения температуры почти до голоценового уровня и потом снова уменьшение температуры к нулю. Такие резкие флуктуации называются **события Дансгора-Оешгера** – событие DO. **События Хайнриха (H)** - тоже очень чёткие холодные события. Они интересны своей биологической особенностью. Для климатических целей были пробурены колонки грунта в Атлантическом океане, и ожидалось, что они будут заполнены морскими отложениями, то есть очень тонким

материалом характерного химического состава. Однако в каких-то слоях были обнаружены неожиданные вещи: грубые обломки минералов, совершенно не свойственные этому району. Единственная причина, по которой они могли попасть в море и уйти в донные отложения, — это то, что в эти эпохи был усилен айсберговый вынос из материковых льдов. Также при рассмотрении событий DO и H удивляет быстрота явлений. Потепление происходило буквально за десяток-другой лет. Если сравнивать эту картину потепления с современным потеплением климата, то получатся сопоставимые вещи. Отсюда возникает опасение: если такое событие было в прошлом, то оно может случиться сейчас. Мы живем в мире, когда мы думаем всё время о плавных событиях. События Дансгора-Оешгера показывают, что изменения могут быть резкими.

## Лекция 18

### Керны Гренландии и Антарктиды.

Когда говорят об изменениях климата, обычно привлекают какие-то свидетельства, и если эти свидетельства не прямые, то есть полученные не из метеорологических измерений, то это обычно анализ культурных произведений. Например, считается, что Брейгель идеально воспроизводил своих картинах так называемый Малый Ледниковый период, потому что он изображал территорию современной Голландии в условиях постоянно снежной зимы, которой современный климат не знает. В конькобежном спорте представители сборной Нидерландов также имеют исторические преимущества, хотя сейчас зимой покататься открытым небом может быть негде. Отсюда берёт начало традиция нидерландских марафонов по замерзшим каналам, но климатическая статистика такова, что в последний раз в полной мере крупнейший из этих марафонов был проведён в 1981 году. Климатические характеристики восстанавливаются в основном в современном мире по данным **кернов**. Они бывают ледяные, и самый известный керн — это керн озера Восток. Помимо большой скважины над озером Восток, начали тренироваться в бурении на более привычных и близких нам покровных ледниках Гренландии. Получают керн достаточно небольшого диаметра (как обычная водопроводная труба), вынимают его и затем нарезают лазером. В лаборатории керн подтапливают, и потом начинается изучение непосредственно состав изотопов и газового состава, потому что пузырьки воздуха, которые в нём замёрзли, содержат информацию об атмосфере прошлого. Определённая часть кернов находится на длительном хранении при минусовой температуре, в том числе на Шпицбергене, там же, где существуют склады семян и биологического разнообразия. Самый простой анализ — это анализ непосредственно механического содержания, в случае льда Гренландии за приблизительно 110 000 лет. Там, где нет ледников, в ход идут отложения озёр и даже глубин Мирового океана. Чисто теоретически, если даже все покровные ледники растают, то останутся сохранённые при постоянной отрицательной температуре керны, которые были добыты за последние 20 лет. Первичный анализ кернов был достаточно примитивный. Их изучали на содержание примесей, то есть того, что могло быть принесено в Гренландию, допустим, с Европейского материка. Выяснилось, что в кернах сохраняется не только информация о газовом составе, но и информация о таких событиях, как развитие и коллапс древних цивилизаций. Например, долгое время деньги, которые чеканились, требовали добычи серебра, что очень часто связано с добычей свинцовых руд. В Римской Империи свинец имел очень серьезное значение, из него делали водопроводы, которые питали города. По гренландскому керну удалось восстановить периоды, которые приблизительно соответствовали расцвету цивилизации и проблемам, то есть финансовым кризисам. Когда цивилизация переживает расцвет, то добывается больше серебра и больше свинца, и всю пыль, которая переносилась на ледники Гренландии, можно увидеть в керне.

## **Глобальный конвейер Мирового океана.**

Если кернов нет, то есть Мировой океан, который тоже является исторической записью, потому что он обладает своей собственной циркуляцией. Глобальная океаническая циркуляция — это открытие последних 50 лет. Это по-другому называется «**глобальный океанический конвейер**», то есть система, которая создается при текущем положении материков и океанов. Она связывает собой глубинные и поверхностные воды. Это так называемая термохалинная циркуляция, которая построена не только на разнице температур, но и на разнице в солёности. Опускание вод в полярных широтах, которое мы хорошо знаем как ныряние Гольфстрима и Северо-Атлантического течения, возможно только если вода у поверхности обладает большей плотностью и отрицательной плавучестью, то есть более солёные и более тёплые воды опускаются ниже. При распреснении вод в Северной Атлантике исчезают вертикальные движения, и вот уже Северо-Атлантическое течение не проникает далеко на север, образуется холодная аномалия воды, и холод переносится атмосферными движениями на континент. Если бы Атлантический океан был менее глубоким, то конвейер в Северную Атлантику, скорее всего, не дотянулся бы. На севере Тихого океана такого не происходит в том числе потому, что эта часть Тихого океана достаточно мелкая для того, чтобы там могли существовать такие движения. Именно наличие так называемой энергоактивной зоны на севере Атлантического океана связано не только с тем, что туда направлены течения, но и со строением океанической толщи, то есть глубиной его дна. С опоясывающими Антарктиду течениями связана некоторая изоляция Антарктиды и укрупнение в историческом периоде существующего там ледяного щита. Помимо таких эффектов, как устойчивое распреснение, которое может, условно говоря, похоронить Гольфстрим, при активном расширении Панамского пролива определённая часть вод не будет отклоняться к северу и может уходить в другую часть, а не идти в Гольфстрим.

Мельчайшие изменения в глобальном конвейере порождали изменения в циркуляции. Мы знаем об этих изменениях из анализа кернов океанических отложений, то есть там, где не было льда, там сохранились определённые стратификации осадочных пород. Даже если нет стратификации, то глубокий океан сам по себе сохраняет память о холодных событиях. Если 2020 или 2021 год станет исключительно холодным, то эта память отложится в глубоком океане. Океан за год охладится, из поверхностной части более холодная и плотная вода в глубь океана, и в нижних слоях стратификации слой холодной воды будет виден достаточно долгое время.

## **События, известные из палеогеографии.**

Существуют вещи, о которых мы знаем исключительно из палеогеографических источников. Например, в **молодом дриасе** происходили очень интенсивные похолодания. Случилось резкое похолодание на 10-15°C, которое могло быть вызвано сочетанием определенным образом между собой древних озёр и блокирующих их айсбергов. Озеро Агассис – то, что существовало на месте нынешних Великих озёр.

Это подтаявшее ледниковое озеро, из которого вытекали ледниковые реки по всей современной территории Соединенных Штатов. Сток, например, реки Миссисипи был намного выше, чем сейчас, именно из-за того, что тающий ледник очень активно восполнял недостаток вод. Идет потепление и отступление ледника, образуются проозёра, в том числе озеро Агассис, которое находилось совсем рядом с заливом Святого Лаврентия. По размеру оно было приблизительно с Черное море. Вода из него образовала прареки, одна из которых была в районе Миссисипи, а другие через пролив Святого Лаврентия тоже стекали в океан. В определенный момент айсберги ломаются, и вся масса воды начинает неограниченно выливаться в Атлантический океан. Поскольку вода пресная, то Северная Атлантика начинает распресняться. События, аналогичные прорыву озера Агассис, в принципе происходили. За счёт распреснения Северной Атлантики Гольфстрим начинал нырять, климат снова становился холоднее, возникали ледовые заторы, и само озеро немного подмерзло. После этого климат начинал выравниваться, потому пресная вода начинала распределяться по Атлантике, и Гольфстрим с Северо-Атлантическим течением снова выходили на поверхность.

В молодом дриасе климат был более сухим и более холодным. Ещё он был более запыленным, то есть пыль, которая переносилась с достаточно сильными ветрами, дующими с ледника на поверхность, этим ледником не занятую, делала климат пыльным. В это время отмечается большое количество событий Хайнриха, то есть отрезков плохо объяснимых похолоданий.

В последнем тысячелетии мы приблизительно знаем, что происходило в истории, и поэтому очень любопытно проследить, как на эти события влияли изменения климата. Тут речь идет как об изменении светимости Солнца, так и о внутренних колебаниях климата. За последнюю тысячу лет было два главных события: **средневековое потепление**, приблизительно до 1200 года, и **малый ледниковый период**, который начался с 1400 года, и его некоторые проявления были даже в XIX веке.

Как это проявилось в мировой истории? Когда возникло средневековое потепление, то за счёт того, что уменьшилась площадь льдов в северных водах, очень активно началось освоение северных просторов. Открытие викингами Гренландии и ее заселение произошло именно в эпоху средневекового потепления. Окончание потепления и привело к коллапсу и деградации поселений викингов, которые были на территории Гренландии. Одним из интересных палеогеографических событий был так называемый **минимум Маундера**, то есть период уменьшения активности Солнца 1645-1715 годов, который совпал довольно точно с периодом правления короля-Солнца Людовика XIV. Снижение солнечной активности очень сильно сказалось на климате. В период минимума Маундера пятен на Солнце практически не наблюдалось. Ряд историков считает, что с подобными климатическими событиями были связаны средневековые эпидемии чумы, которые уносили большой процент населения Европы. Также каждое серьёзное вулканическое извержение вызывало за собой изменение

оптической толщины атмосферы. Солнечная постоянная тоже немного колебалась, но в разумных пределах.

### **Изменения климата в последние 150 лет.**

Если мы говорим об изменениях климата за последние 150 лет, то это собственные колебания системы. Как любая сложная система, климатическая система порождает собственные колебания. При этом шестидесятилетние циклы перестали коррелировать с изменчивостью температуры, и это является одним из свидетельств антропогенной природы современного изменения климата. Если бы такого количества углекислоты не было накачено в атмосферу, то скорее всего потепление конца XX века тоже было бы, но оно, во-первых, постепенно сходило бы на нет, а во-вторых, не имело бы такой амплитуды. По Малинину и Войновскому в XX веке было два периода устойчивого роста. Это современный рост с 1980 года и так называемое потепление Арктики двадцатых-тридцатых годов. Как раз в двадцатых-тридцатых годах началось активное освоение Советским Союзом Арктики именно из-за того, что безледокольный проход в том числе по Северному морскому пути был достаточно легко осуществим. Это продолжалось недолго, уже в сороковых-семидесятих годах пошло похолодание, и понадобилась ледокольная проводка, что в экономическом плане сильно подняло индустрию. Похолодание, которое началось в сороковых годах, связано с относительно холодной погодой во время Великой Отечественной войны. Минимумы температуры на многих станциях европейской территории России отмечались в начале сороковых. В мире уже с 1985 года не было ни одного года, когда средняя температура по земному шару была бы ниже стандартного значения, то есть в последние десятилетия наблюдаются исключительно положительные аномалии. Также можно проследить изменение осадков в период с 1951 по 2010 год. Изменение осадков, которое сильно влияет на мировое хозяйство, неоднородно. В среднем по земному шару количество осадков растёт, потому что более тёплый воздух может содержать больше влаги. В районе центральной Европейской равнины количество осадков устойчиво увеличивается, и в Москве оно подрастает до 700 мм в год. Также количество осадков увеличивается на востоке Соединённых Штатов Америки и Североамериканского континента. Самое интересное происходит в муссонных регионах – там, наоборот, осадков становится меньше. Начиная с широты Чёрного моря, к югу, учащаются засухи, что связано с уменьшением количества осадков в климатическом масштабе. Существуют целые пояса, в которых средний тренд по изменению достигает 100мм в десятилетие. С нагнетанием углекислоты в атмосферу, скорее всего, интенсивность этих трендов будет повышаться. За последние годы уровень моря повысился где-то на 4 см, то есть приблизительно на миллиметр в год. Это происходит не только за счёт таяния ледников, но ещё за счёт физического расширения ледяной шапки. По оценкам, за последние 20 лет уровень океана растёт на 3 мм в год, из-за чего правительство Нидерландов каждые 5 лет тратит огромные деньги на обновление инженерных систем, так как работа водно-ирригационных систем непосредственно влияет на количество

осушенных территорий. Весенний снежный покров деградирует. Также происходит деградация ледников. Сентябрьский ледяной покров в Арктике тоже устойчиво падает. Сентябрь становится более судоходным, что положительно сказывается на арктической экономике и прежде всего транспортной экономике. Это вывоз сырья из портов, которые приурочены к арктическим месторождениям. Это совпадает с отрицательным балансом массы многих горных ледников. Если считается, что в Европе и в Андах более-менее нулевой тренд, а кое-где в Европе даже в течение последнего десятилетия XX века некоторые ледники Скандинавии наращивают свою массу, все остальные ледники, то есть антарктические, великие азиатские ледники, ледники Аляски, ледники Патагонии деградируют в течение последних 50 лет. Климатические индексы условно периодичны. Можно увидеть периодичность Североатлантического колебания и периодичность колебания, связанного с Эль-Ниньо, или Южного колебания. Сильные Эль-Ниньо в начале и в конце 2010-х привели к тому, что возникла так называемая пауза в глобальном потеплении.

По реконструированным и воспроизведенным в компьютерном эксперименте аномалиям температуры по отношению к средней за 1500-1850 годы мы видим несколько устойчивых похолоданий и несколько устойчивых утеплений. Чем ближе к 1000 году нашей эры, тем более велика неопределенность. На масштабах времени особо выделяется потепление последних 100 лет, то есть мы говорим о повышении на градус с начала современного лавинообразного изменения температуры.

В прогнозе погоды при наличии вычислительного ресурса суперкомпьютер всё точнее и точнее приближается к истинному решению систем уравнений движения атмосферы в пределах 10 дней. Но как бы вы не мельчили сетку, не будет стопроцентной точности прогноза, из-за того, что вы постоянно ищите только приближённое решение. Поскольку уравнения могут решаться разными способами, то так и создаются разные погодные модели. **Ансамблевое прогнозирование** происходит, это когда вы делаете один и тот же прогноз немного разными способом. Невязки из-за технической погрешности обычно получают, внося в реальную погоду небольшие искажения. Если условия для прогноза хорошие, то прогноз разным версиям получится похожим. Когда у нас получатся ансамблевые решения, мы увидим среднее значение, которое будет гораздо точнее, чем один, но даже очень качественный прогноз. Если разброс графиков большой, то прогноз является менее точным, что бывает, когда меняются атмосферные фронты. Когда при разных прогнозах разные графики совпадают, то это значит, что прогноз надежен.

## Лекция 19

### Изучение причин происходящих климатических изменений.

Проблема изучения причин климатических изменений достаточно сложная, и подходы, которые используются для её решения, достаточно общие, они применяемые и в других науках.

Как описывать динамику поведения сложных систем?

**Динамическая система** – любая целостная конструкция, состояние которой характеризуется некоторыми показателями. Для изучения динамики системы нам необходимо уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = F(x) = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

где  $x$  – характеристика системы (например, температура),  $t$  – время,  $V$  – потенциал.

Это выражение несёт не строгий математический смысл, а лишь показывает, что изменение некоторого параметра во времени определяется функцией. Как правило, производная в данном уравнении существует всегда. Такая форма универсальная и используется для всех динамических систем (например, для маятника).

Состояние равновесия – такое, при котором закончились переходные процессы, то есть  $\frac{dx}{dt} = 0$ .

При рассмотрении эволюции динамических систем необходима **оценка положения равновесия**, так как любая динамическая система стремится к равновесному состоянию. Примером такого состояния можно назвать геострофический режим движения, в котором уравнивают друг друга силы Кориолиса и барического градиента. Требуется найти точки (может быть одна или более), в которых система уравновешена.

Теперь рассмотрим выражение  $-\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ . Его значение говорит о достижении в точке  $X_0$  точки экстремума. Эти точки крайне важны, так как в них система может находиться продолжительное время (например, климат остаётся неизменным, потому что находится в состоянии равновесия). Важно знать **точки достижения равновесия**, а также устойчиво это равновесие или неустойчиво.

**Устойчивое положение равновесия** – такое положение равновесия, к которому система возвращается даже при выведении из равновесия (малых возмущениях).



Находясь в устойчивом положении равновесия, значения характеристики продолжают колебаться, но при этом возвращаются в положения равновесия.

Функция потенциала позволяет быстро понять устойчивость тех или иных выражений. Если точка равновесия на графике этой функции – локальный минимум, или потенциальная яма, это равновесия устойчиво; если локальный максимум – равновесие неустойчиво, то есть при выходе из положения равновесия система перейдёт в иное состояние, характерное для потенциальной ямы.

Точки устойчивого равновесия притягивают в себя все находящиеся вокруг положения, то есть являются притягивающими точками - **аттракторами**. Именно вокруг аттрактора происходят колебания.

Известным аттрактором в математике является аттрактор Лоренца.

Далее рассмотрим понятие бифуркации.

Пусть  $\frac{dx}{dt} = F(x, c)$ , то есть система зависит ещё и от некоего параметра  $c$ .

Тогда **точка бифуркации** – это точка такого резкого изменения влияния параметра  $c$  на значения  $x$ , при котором происходит раздвоение графика. Так, бифуркация характерна, например, для химической реакции Белоусова-Жаботинского, где, начиная с определённой температуры, вещество может быть красного или зелёного цвета, причём предсказать цвет невозможно.

**Структурная неустойчивость** - переход системы в иное положение, вызванный медленным изменением окружающей среды. Такой переход изучается теорией катастроф. На графике он выглядит как переход в ходе колебаний значения  $x$  из одной потенциальной ямы в другую в связи с опусканием расположенного между ними поднятия.

**Переброс** – переход системы из одного состояния устойчивого равновесия в другое, вызванный резким колебанием. На графике выглядит как резкий переход состояния из одной потенциальной ямы в другую через «горб» локального максимума. В качестве примера можно привести резкий скачок погоды в Москве с тёплой дождливой на холодную снежную.

**Резонанс** – отклик колебательной системы на внешнее воздействие, определяемый внутренней частотой колебаний. Возьмём для примера качели: систему можно раскачать до очень больших амплитуд, если подталкивать в такт (через период, два периода и т. д.) их собственному движению в необходимой точке, или напротив, сократить амплитуду при несвоевременном воздействии на них.

**Стохастический резонанс** – явление, характерное для системы, обладающей возможностью переброса (момент переброса случаен, но за счёт регулярности переброса существует его средний период), когда при наличии внешней силы, совпадающей по ритму со средним периодом переброса, внешняя сила увеличивает амплитуду этого явления.

**Шумы** – беспорядочные относительно слабые внешние воздействия на систему, непредсказуемо переводящие её в другое состояние, вызывая флуктуации этой системы (броуновское движение).

Флуктуации происходят не около начальной точки, а постепенно уводят систему от неё пропорционально корню из прошедшего времени  $\sqrt{t}$ . Известно рассмотрение проблемы через задачу «о пьяном моряке», делающим после выхода из бара хаотично шаг влево или шаг вправо, но при этом не оставаясь у дверей заведения, а удаляясь в неопределённом заранее направлении по улице на расстояние, пропорциональное корню из времени.

Шум бывает **белый** (не меняющийся со временем) и **красный** (зависящий от произошедших ранее отклонений). При этом, красный шум постепенно увеличивает амплитуду воздействия на систему.

**Синхронизация** – явление, сходное со стохастическим резонансом, заключающееся в установлении для двух систем сходного (или кратного) режима колебаний.

**Важный вывод** из рассмотренного выше: источник эволюции не обязательно искать вне объекта.

### **Динамика климатов на разных масштабах.**

На предыдущих лекциях мы рассматривали историю изменений климата, основанных на эмпирических данных. Теперь рассмотрим эти данные и попробуем дать объяснения тем или иным изменениям.

Начнём с изменения климата и динамики изменения количества углекислого газа в атмосфере, которое контролирует изменения через парниковый эффект. В свою очередь, количество углекислого газа определяется глобальными тектоническими движениями. На протяжении последних 30 миллионов лет происходило уменьшение количества диоксида углерода и снижение температуры. Площадь криосферы Северного полушария также изменялась в зависимости от количества углекислого газа за это же время.

В ответ на уменьшение углекислого газа постепенно увеличивалась площадь ледниковых щитов. Но при достижении определённого значения (240 ppm), площадь оледенений возросла скачкообразно. Здесь система подошла к точке бифуркации, сработали обратные связи, и система скачкообразно перепрыгнула в ледниковое состояние, появился Гренландский и другие ледниковые щиты. Это очень характерный пример бифуркации.

Теперь посмотрим изменения на протяжении последних пяти миллионов лет, когда колебания имели периодичность 41 000 лет (известны как «Мир-41 тысячи»), а после появились 100 000 летние колебания. И для динамики последних ста миллионов лет наблюдаются ритмичности в 100 000, 40 000, 20 000 лет, а также имеется красный шум. Его амплитуда тем больше, чем больше ритмичные отклонения. Попробуем их объяснить:

Сначала обратим внимание на астрономические показатели (орбитальные параметры планеты) – наклонение) и комплексная величина (произведение эксцентриситета на синус долготы перигелия). В результате наблюдается сложная реакция климата, обусловленная обострением тепловых различий между сезонами. Лето становится теплее, зима - холоднее, растёт годовой приток радиации в высокие широты, то есть в районы основного формирования ледников. Следовательно, с увеличением наклонения планеты на плоскости орбиты наступали условия межледниковья, а его уменьшение вело к оледенению.

Помимо влияния орбиты, действует ряд обратных связей, усиливающих аномалии. К ним относятся связи с водяным паром, альбедная, связь температуры с углекислым газом через процессы Мирового океана.

Теперь обратимся к данным голоцена – времени межледниковья, первой морской изотопной стадии. Голоцен был вызван влиянием орбитальных параметров. В связи с изменениями наклонения изменилось и количество аномалий инсоляции, которые несколько сместились на более поздние месяцы за последние 20 тысяч лет. Эти аномалии были максимальны примерно 9 000 лет назад, и к этому времени Земля очень быстро освободилась от дополнительного льда. После этого аномалии прекратились, температура начала убывать. Однако рассмотрим, в частности, Западную Африку: там засушливость увеличивалась медленно, но примерно 9 000 лет назад произошёл резкий скачок, обусловивший сухой сегодня климат. Тогда система африканского климата подошла к точке бифуркации на местном, но не общеземном уровне, что привело к смене саванн на пустыни. При этом понятно, что физика климата Западной Африки обусловлена муссонами, но они резко прекратили проникать вглубь Африки, остановившись на другом широтном уровне. Мы не знаем, что происходит конкретно, но можем описать изменения нужными терминами: бифуркацией или, возможно, перебросом. Факт того, что это мог быть переброс, крайне тревожен для человечества,

ведь результатом переброса может быть и нынешнее потепление, тогда следующий переброс может отправить планету и в стадию резкого похолодания, о чём сейчас мало кто задумывается.

Природные зоны Африки также изменились в сравнении с ситуацией, наблюдавшейся 6 000 лет назад. Тогда здесь не было пустыни, но потом всё скачкообразно изменилось.

Рассмотрим и изменение Индийского муссона. Видно, что в ответ на астрономические изменения, когда постепенно убывали аномалии температуры, снижалась интенсивность муссона. Тут тоже наблюдается скачок примерно 4200 лет назад, когда его интенсивность упала резко. Именно с этим скачком, кстати, и связано падение царства Аккада в Месопотамии. После началось постепенное возвращение к бывшему состоянию. Это тоже можно рассматривать как переброс из влажного состояния в сухое с последующим возвращением в прежнее состояние из сухого во влажное.

Подводя итог теории климата плейстоцена и голоцена попробуем дать объяснения. Ритмичность 40- и 20- тысяч лет была связана непосредственно с линейной реакцией или с синхронизацией, но точно сказать нельзя. Ритмичность 100 000 лет — это характерный пример стохастического резонанса. Вероятно, причиной был шум внутри системы с периодом в 100 000 лет, а внешним сигналом были слабые изменения эксцентриситета, имевшие схожий период. Эти изменения очень слабы и не могли бы вызвать никакого изменения климата, но в сочетании со внутренним шумом действие резонанса вполне возможно. Сегодня именно так большинство теорий объясняют 100 000 летние колебания. Красный шум, в свою очередь, связан с тем, что климатическая система состоит из совершенно разных по инерционным свойствам взаимодействующих элементов. Атмосфера флуктуирует очень быстро, Мировой океан, напротив, очень медленно, ледники ещё более тяжёлые для сдвига. Именно такое сочетание быстро и медленно флуктуирующих объектов способствуют развитию шумового поведения, когда ритмы смазываются и выражаются плохо. Амплитуда растёт вместе с периодом колебаний, что указывает на красный шум. К слову, это характерно для любой такой системы.

Теперь перейдем к физике колебаний климата, связанных с распреснением вод. Основная идея этих изменений заключается в том, что Северная Атлантика является ключевой для планеты точкой: все изменения здесь непременно коснутся всей планеты. Объясняется это следующей связью: распреснение в этом районе останавливает тёплое течение и приток тепла. Наоборот, с увеличением солёности, усиливается и конвекция, и подтягивание тёплых вод с субтропиков, в результате чего обогреваются огромные площади в Евразии. Иногда происходят резкие события (осцилляции Дансгора-Оешгера и Хайнриха). Здесь физика уже не орбитальная – она принципиально другая. Таким образом, здесь мы переходим к временным масштабам, близким по размерам к тем, что мы наблюдаем сегодня, так как темпы потепления при этих колебаниях очень

напоминают темпы сегодняшнего потепления. После потеплений следовали похолодания, наиболее известное – похолодание молодого дриаса.

Наконец рассмотрим изменения последних 1-1,5 тысяч лет. Около тысячи лет назад было ощутимо теплее в **средневековую тёплую эпоху**, чем сегодня, позже планета охладилась, так как наступил **малый ледниковый период**, а после климат стал теплеть, плавно переходя к этапу современного антропогенного потепления.

Если мы рассмотрим ряд восстановлений климата за этот период для отдельных мест, то везде будут заметны следы этих эпох. Что касается их генезиса, то эти изменения объясняются разными показателями инсоляции. Во-первых, Солнце светило с разной степенью интенсивности – изменения солнечной активности было установлено методом изучения солнечных пятен, а также данным изотопного и дендрохронологического анализов. Позже это было подтверждено сравнительным анализом Солнца и других похожих звёзд. Во-вторых, это связано с активностью вулканов и количеством крупных извержений. Наибольший интерес представляют те, которые захватывали выбросами стратосферу. Известно, что выбросы сернистого газа в атмосферу приводили к появлению слоя  $H_2SO_4$  и уменьшению притока радиации. Одно из таких явлений известно как «год без лета». Наложение этих двух факторов играло весьма заметную роль и обусловило наличие этих эпох понижения и повышения температуры.

## Лекция 20

### Вариации солнечной постоянной, углекислого газа и оптической толщины атмосферы.

Когда мы представляем последний (столетний) интервал, важно понять, с какими условиями мы входили в данные изменения климата. Для более точного анализа обратимся к результатам последней тысячи лет: была теплая эпоха, которая впоследствии сменилась на холодную, то есть на малый ледниковый период. После этой эпохи вновь случился теплый период, перешедший в современное потепление. Генезис данных изменений связан с увеличением притока солнечной энергии в климатическую систему по **двум причинам**:

- 1) Изменения количества солнечной радиации, поступающей на земную поверхность;
- 2) Солнечная радиация, поступающая на Землю, встречала на своем пути слой аэрозолей, связанный с извержениями вулканов, т.е. вулканические извержения меняли прозрачность.

В тех случаях, когда данные два фактора совпадали по времени друг с другом, должны были происходить наибольшие аномалии притока энергии к земной поверхности, соответственно должны были генерироваться наиболее отчетливые отрицательные аномалии в температуре воздуха. В течение этого периода изменений парниковых свойств практически не происходило. Только ближе к нашему времени увеличился парниковый эффект в связи с антропогенным воздействием.

### Вулканический аэрозоль.

Изменение количества солнечной радиации связано с вулканизмом. Обязательным условием климатически значимого извержения вулкана является выброс столба веществ в стратосферу (от 10 до 30 км высотой), так называемое «взрывное» извержение. Главное извергаемое вещество – сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ). Под влиянием солнечной радиации сернистый газ за несколько дней превращается в капельки серной кислоты. Часть веществ в тропосфере очень быстро возвращается на земную поверхность, поскольку происходит вымывание осадками, оседание ввиду развитой циркуляции воздуха. В стратосфере же, напротив, вещества задерживаются из-за отсутствия водяного пара, вертикальное движение здесь в два раза слабее, чем в тропосфере. Последнее крупное извержение было в 1991 году в Индонезии, когда извергался вулкан Пинатубо. Ему предшествовало извержение вулкана Эль-Чичон в Мексике в 1984 году. Тропосферная часть выброшенного вещества двинулась в Карибский район и довольно быстро исчезла. Стратосферная же часть направилась восточными потоками в Тихий океан и примерно через две недели после извержения

прошла над Гавайскими островами, где расположена одна из наилучших в мире обсерваторий Мауна-Лоа. Станция провела лазерное зондирование вулканического облака, проводились измерения частиц по размерам. Радиус и повторяемость частиц были хаотичными. Через три недели облако, совершив полный оборот, вновь появилось над станцией Мауна-Лоа. Все наиболее крупные частицы за это время выпали под действием силы тяжести и ушли из атмосферы, сернистый газ превратился во вторичный аэрозоль. Образовалось моодисперсное облако капель с размерами чуть меньше 1 мкм. Далее облако диффундировало в горизонтальной плоскости, постепенно захватывая новые территории. Но влияние облака на количество радиации станции Мауна-Лоа весомо. Прошел примерно год, когда эти эффекты начали распространяться по всему земному шару. В Москве пик увеличения оптической толщины в 1990-х годах связан с извержением вулкана Пинатубо. С тех пор крупных извержений не было. Такие события происходят нерегулярно, за 100 лет в среднем имеется около трех крупных извержений. Сигнал климатически значимого извержения ощущается в течение 2-3 лет (около года формируется облако, затем оно увеличивает планетарное альbedo, а щит капель серной кислоты на длинноволновые потоки практически не влияет).

### **Изменения климата в индустриальную эпоху.**

Изменяется температура, происходит глобальное потепление на территории всего Земного шара за исключением одной зоны на севере Атлантического океана, где **термохалинная циркуляция** не поддается всемирному глобальному потеплению. Это происходит из-за увеличения на данной территории стока пресной воды. В более сильной степени теплеет на материках, чем в океанах. Осадки, в свою очередь, увеличиваются и уменьшаются в некоторых районах из-за распределения осадков, связанного с фронтами и с внутритропической зоной конвергенции. Происходит сдвиг этих зон от их современного положения из-за потепления. Ввиду этого наблюдается дефицит осадков в Средиземноморье и их увеличение в более северных районах. Таким образом, осадки увеличиваются в умеренных широтах, где их и так достаточно, и убывают в более засушливых районах. Реакция окружающей среды на потепление климата характеризуется разрушением горного оледенения, ростом уровня океана, окислением воды в Мировом океане, деградацией многолетней мерзлоты и так далее. Генезис изменений климата сопоставляется с тем, что если у нас есть глобальное потепление, то следует посмотреть, какой тепловой баланс у данной системы в целом. Солнечная постоянная с годами незначительно изменяет свою интенсивность влияния на земную поверхность. Выброс углекислого газа в атмосферу увеличивается, что усиливает парниковый эффект. Часть радиации, излучаемая поверхностью Земли, возвращается в воздушное пространство. Тропосфера получает дополнительную энергию, из-за чего температура воздуха увеличивается. На уровне тропопаузы углекислый газ, метан, галокарбоны и др. обеспечивают потепление.

**Вулканический аэрозоль** работает для того, чтобы увеличить альбедо, его появление обеспечивает отрицательную составляющую в радиационном балансе. Мельчайшие фрагменты углерода (сажа) обеспечивают положительную составляющую в радиационном балансе, поглощая солнечную и длинноволновую радиацию и обеспечивая прямое нагревание атмосферы. В сумме всех факторов преобладает положительная составляющая радиационного баланса. Современное изменение радиационно-активных показателей влияют в сторону потепления климата. Важнейшую роль играют выбросы различных газов в атмосферу, и к ним добавляется немаловажное влияние черного аэрозоля. С каждым годом усиливается антропогенное воздействие на атмосферу.

### **Моделирование изменений климата в индустриальную эпоху.**

Моделирование изменений климата играет большую роль в количественной оценке влияния  $\text{CO}_2$  на земную поверхность. Первые климатические модели были разработаны в 1970 году, с каждым днем этот подход к изучению климатических изменений развивается все больше. Существует схема компьютерного моделирования, где рассматривается прогноз погоды, для которого нужна модель атмосферы и верхнего слоя океана (суша и растительность). А для моделирования земной системы нужно учитывать адекватное изменение не только в атмосфере, но и в ледниках, океане и так далее. Для этого строится **модель климатической системы**. Данная модель описывается формулами, которые характеризуются параметрами и граничными условиями: солнечной постоянной, скоростью вращения планеты, распределением материков и океанов и т.д. Вырабатываются квази-колебания в результате сезонного хода. Мы задаем в модели сезонный цикл инсоляции, одинаковый каждый год, и заставляем модель реагировать на эту инсоляцию одинаковым образом. Происходит пошаговое интегрирование модели, которая, в свою очередь, должна откликнуться флуктуациями, потому что каждый год климат индивидуальный и не может быть в точности таким же, как климат предыдущего года. Климатическая система стремится к статистическому равновесию в среднем за определенный интервал времени. Важным условием создания модели является правильность ее составления. Чтобы получить глобальное потепление в модели, мы задаем ход  $\text{CO}_2$ , в результате чего модель начинает «теплеть». Чтобы оценить отклик модели на увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, нужно измерить изменение таких показателей, как температура, соленость, осадки, речной сток и др. В моделях Земной системы мы включаем в рассмотрение биогеохимический цикл в целом, в который включается антропогенное воздействие, то есть **эмиссия**. Данные эмиссии создадут определенный прирост концентрации углерода, которая также повлияет на парниковый эффект и рост температуры. В настоящее время в мире имеется много моделей, представленных различными аббревиатурами (русская – INM). Начале 1990-х годов Всемирная метеорологическая организация создала орган, управляющий процессом действия



моделей. Была разработана IPCC (Межправительственная группа по изменениям климата). Специалисты данной организации координируют изменения, наблюдаемые в разных странах. Это практически единственный источник информации, имеющий ряд блоков в своей структуре, отвечающих за физику, моделирование, интерпретацию результатов, направленную на смягчение последствий и адаптацию климата. Сейчас заканчивается шестая стадия наблюдений. Стадии длятся 6-7 лет. **CMIP6** – Объединенная модель изучения; проект, направленный на организацию экспериментов по одинаковым сценариям, одинаковую обработку и предоставление результатов в рамках этих экспериментов.

В моделировании возникают свои проблемы. Например, мы хотим сделать контрольный эксперимент: задаем все параметры, равные современному климату, включаем на внешней границе атмосферы ход инсоляции, ожидаем, что все будет идти по времени. Получается так, что модельный климат растет или, наоборот, убывает. Проблема в том, что мы стартуем с несогласованными данными. Создание исходного поля необходимо не только для прогноза, но и для климата. Нужно добиться того, чтобы из него ушли ненужные тренды и произошло согласование термической структуры океана, как самого медленного инерционного объекта, с внешними астрономическими условиями. Без предварительного согласования правильный результат не может получиться.

### **Моделирование климата за последние 1000 лет.**

Взято примерно 30 моделей, показывающих примерно одинаковый исход: изначально довольно высокие показатели температуры, затем ее снижение (малый ледниковый период), затем увеличилось содержание углекислого газа, и температура стремительно возросла. Модели согласованно прописывают все экстремумы, поскольку используют одно и то же поле. Имеется большой разброс данных. Мы считаем, что каждая модель представляет собой член статистического ансамбля, и тогда среднее значение по ансамблю должно давать более надежные результаты, чем отдельный компонент этого ансамбля. **Ансамблевый подход** применяется и при моделировании погоды, и при моделировании климата.

### **Моделирование климата XX века.**

Среднее значение по результатам моделирования получается сглаженным, потому что каждая модель по-своему «шумит». Они реагируют на различные сигналы, но каждый шум у всех моделей не согласован. С практической точки зрения, в последние 10 лет температура выросла, а потом стабилизировалась, но модели продолжали показывать рост температуры. Это явление было названо «дырой» или «паузой» в глобальном потеплении. Результаты атрибутирования установили, что глобальное потепление связано ни с чем иным, как с эмиссией CO<sub>2</sub>. География потепления отражена по-

разному: в реальности теплеет в средних широтах, а на модели – у побережий материков. Вывод таков: чем меньше регион, для которого мы хотим применить данные, тем больше будет вероятность ошибки.

### **Изменения климата на малых масштабах.**

Изменение климата — это синтез естественных изменений, которые накладываются на тренд антропогенных изменений. Межгодовые аномалии: Эль Ниньо – Ла Нинья (Южное колебание), NAO (Северо-Атлантическая осцилляция). К длительным изменениям можно отнести современное распреснение вод Северной Атлантики, которое происходит из-за увеличения количества осадков. В ответ на это явление происходит ослабление переноса в океане, которое сказывается на средних картах аномалий. Также существует изменение активности ураганов, в Америке создаются индексы активности ураганов.

## Лекция 21

Для моделирования современного климата был создан проект CMIP6 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. В этом эксперименте участвуют более 70 моделей. Сейчас, когда эта тематика стала признаваться очень важной и когда появились компьютерные и интеллектуальные ресурсы в разных странах, то полноправными участниками такого рода проектов становятся научные группы не только из США, Германии, Великобритании и Франции, но также и из Бразилии, Индии, Кореи. Сейчас этот эксперимент активно развивается, а несколько лет назад были заполнены архивы данных по предыдущему проекту CMIP5. Эти эксперименты отражаются во многих знаковых иллюстрациях, характеризующих изменения современного климата и климата будущего.

### **Моделирование климата XX века.**

Если мы правильно вводим все внешние данные, то мы получаем модельную кривую по времени, описывающую изменения современного климата. Условно можем сделать эксперимент, где X - ось времени, а Y - ось температуры. Если на протяжении всего интервала модельного эксперимента задается постоянный не меняющийся набор параметров, то мы в праве ожидать, что модельный климат к нему приспособится таким образом, что полного, детерминированного и одинакового в каждого момент времени приспособления не будет, а приспособление имеется ввиду в статистическом смысле, то есть статистический режим флуктуаций в климатической системе приспособится к заданному набору параметров. Если мы хотим моделировать изменения в ответ на какие-то внешние (по отношению к климатической системе) изменения, например, прирост эмиссии углекислого газа в атмосферу, то мы должны эти эмиссии каким-то явным образом включить в модель. 15 лет назад это выглядело очень просто: задавалась концентрация углекислого газа, и она влияла на климат прямым образом. Сейчас ситуация усложнилась: есть климат, есть блок биогеохимического цикла углерода, есть антропогенное влияние на этот цикл, и изменение эмиссий сказывается на интенсивности биогеохимического цикла. Он в свою очередь оказывает влияние на климат, а сами процессы этого цикла находятся под влиянием климатических изменений. Следовательно, если мы задаем антропогенные эмиссии, увеличивающиеся во времени, то мы получаем модельную кривую, где температура будет возрастать, и для каждого интересующего нас интервала времени можно рассчитать различия между статистическими характеристиками. В каждый такой момент времени эти различия будут разными, и они будут характеризовать реакцию климатической системы на эмиссии парниковых газов. Кроме эмиссий мы включаем все факторы, которые работают. Мы знаем, что на климат влияют вулканические выбросы, аномалии солнечной радиации, использование земель. В результате задается кривая, которая показывает те изменения, на которые мы хотим

получить отклик в климатической модели. Таким образом, мы получаем именно тренды, медленные сравнительно изменений, а флуктуации представляют собой ту внутреннюю динамику, которая свойственна климатическому режиму.

Самая главная мода межгодовой изменчивости - **Южное колебание**, которое складывается из межгодовых аномалий Эль Ниньо-Ла Нинья. В тот момент, когда наблюдается стадия Эль Ниньо, над значительной частью Тихого океана развивается положительная аномалия. В тот период, когда развивается Ла Нинья, аномалия отрицательная. Флуктуации на графике моделирования климата связаны с тем, был ли это год Эль Ниньо или Ла Нинья. Имеются также и региональные аномалии. Важная аномалия для нас - **Северо-Атлантическая осцилляция**. Она создается в совместном синхронном изменении интенсивности циклона в районе Исландии и антициклона в районе того места, где образуется субтропический Азорский антициклон. Когда оба центра активны, мы говорим, что это НАО + - положительная стадия Северо-Атлантического колебания, а когда оба вихря ослабевают и уменьшается интенсивность потока морского воздуха на континент - НАО-.

### **Прогнозирование климата.**

Если мы задаем набор параметров, соответствующий современному климату, то есть тому климатическому режиму, от которого мы хотим изучать отклонения, то на протяжении времени климатического эксперимента, реализуемого в компьютере, мы получаем какой-то режим флуктуации. Модельный климат устанавливается и приспособляется к тем параметрам, которые мы задали. Для того, чтобы получить изменения, нужно задать дополнительный ход, тогда модель климата уже изменится, и температура в течение времени будет изменяться. В итоге мы анализируем разницу между моделями климата с дополнительным ходом и без. Для анализа берутся средние значения и обычно выбираются 20-летние интервалы.

### **Сценарии изменения климата.**

Прежде чем приступать к моделированию климата, нужно иметь математическую модель, компьютер и сценарий (изменение внешних свойств, которое откуда-то должно быть получено). Эксперименты, на которых проводилось прогнозирование будущего состояния климата — это эксперименты, которая организовывала команда СМIP. Был проведен эксперимент третьей стадии, потом пятой, сейчас происходит шестая, и сценарии были разные. В СМIP3 были сценарии, когда из некоторых соображений задавалась кривая будущего изменения концентрации углекислого газа в атмосфере. Поскольку речь шла о прогнозе климата на 100 лет до 2100 года, то кривые выглядели так, что они отражали более активный рост концентрации CO<sub>2</sub>, а некоторые отражали более умеренный ход. Все эти кривые были построены не просто так, это большая работа целых коллективов. Сделать их было трудно, потому что это проблема

предсказания того, как будет развиваться экономика в будущем, и не только экономика, но и наша Земля в целом с точки зрения ее социальной и экономической организации, какие будут темпы роста населения и так далее. Все эти вещи сами зависят от изменений климата, поэтому группам ученых пришлось придумать некие сценарии развития общества, потом понять, какие будут выбросы углекислого газа им соответствовать, и после этого были нарисованы кривые, которые потом были использованы для моделирования. В эти сценарии были заложены некоторые принципиальные идеи. Сценарий А2 - сценарий наиболее жесткий, сценарий В2 - наиболее мягкий. В сценарии В2 предполагалось, что очень быстро мир переходит на **безуглеродную экономику**, имеется некая общая планетарное руководство, крен в сторону экологии, крен в сторону зеленой экономики. Сценарий А2 - все наоборот. По-прежнему борьба регионов, борьба стран, выгоды отдельных стран, регионов ставятся во главу угла, происходит бесконтрольный рост и продолжение использования углеродного топлива, и в результате получается наиболее интенсивный сценарий. Климатические различия получались разные, в сценарии А2 это были более жесткие изменения климата, в сценарии В2 более мягкие. Другие сценарии также представляли собой различные комбинации и сочетания. Говоря про эти сценарии, надо отметить, что во всех сценариях не закладывается что-то кардинальное, то есть предполагается, что каких-то принципиальных новых черт в устройстве мира не будет. Это как бы развитие того, что есть, и оно экстраполируется по времени вперед.

Следующая группа сценариев **RCP** - построение этих сценариев было организовано и похоже, и не похоже на CMIP. В них уже шла речь не о сценариях выбросов углерода в атмосферу, а об эмиссиях. Эти эмиссии и их изменение год от года оценивались в рамках так называемых **интегральных оценочных моделей**- некоего нового изобретения, в которое включалось моделирование развития глобальной экономики, закладывались какие-то социально-экономические изменения, изменения демографии, изменения в географическом положении, в том числе уже закладывались и изменения климата. Это и называется интегральной оценочной моделью. Предполагался определенный сценарий, и изменения климата учитывались как обратная связь на изменения экономики. В результате работы этих интегральных оценочных моделей получался набор характеристик эмиссий, что самое главное, но, кроме этого, получались кривые, которые в конечном счете и стали использоваться для названий этих сценариев. На этих кривых время откладывается по X, а по Y откладывается то изменение в радиационном балансе на уровне тропосферы, которое происходит из-за того, что мы подключаем все эти действующие на климат факторы. Если мы подключаем эти факторы очень интенсивно, увеличиваем сжигание топлива, то и итоговое изменение на внешней границы атмосферы будет больше, чем в том случае, если мы этот фактор каким-то образом контролируем. В самом жестком сценарии получается, что мы стартуем от современного уровня (2000 год) и на протяжении всего этого периода времени происходит рост эмиссий и это все сказывается на том, что на

внешней границе атмосферы мы имеем прибавок количества энергии, и к концу столетия он равен 8.5. Этот сценарий называется **RCP 8.5**. Этот сценарий считается самым жестким. Сценарий самый мягкий **RCP 2.6**. Цифры обозначают изменения, форсинг радиационной на внешней границе атмосферы и используются в качестве индикатора того, какой конкретно сценарий мы выбираем для анализа. Построенных кривых много, и каждая кривая – это плод целой научной группы определенных стран. Однако в качестве основных было взято 4 кривых: самый жесткий сценарий, мягкий и 2 промежуточных. Если посмотреть, какие эмиссии им соответствуют, мы видим, что в самом мягком сценарии предполагается, что буквально еще год отводится на то, что происходит рост выбросов углекислого газа в атмосферу, а потом эмиссии резко начинают убывать. На базе сценариев RCP были проведены соответствующие эксперименты. Сейчас происходит эксперимент CMIP6, в этом эксперименте сделана определенная корректировка. Идея RCP осталась прежней, но к ней еще добавилось некое уточнение (**RCP+SSP**). Смысл в том, что в 5 проекте был использован в каждом случае определенный сценарий, соответствующий 2.6, и такой сценарий был все время один. Он показывал некие средние условия. В том проекте, который происходит сейчас, в каждом случае включены еще дополнительные сценарии, учитывающие общий социально-экономический путь развития. Выбрано то, что при данном типе экономики могут происходить определенные варианты. Это варианты устойчивого развития, некий средний вариант, региональное соперничество, неравноправность, ископаемое топливо.

Посмотрим, какие ожидаются изменения климата с точки зрения их проявлений в разных показателях. Пусть у нас есть кривая, которая показывает реальные изменения температуры с 1950 года по некий отсчетный уровень, а дальше идет прогноз, причем он показан по двум кривым: одна - рост с 8.5, другая - 2.6. Предполагается, что в 2020 году будет достигнут пик выбросов, и после этого предполагается их быстрый спад. Как на это реагирует климат? Температура не убывает, то есть это нельзя ожидать от климата, что мы просто включили эмиссию, температура растет, а если эмиссии отключим - температура начнет убывать. Дело в том, что даже если мы отключаем эмиссию в 2020 году, то все равно в атмосфере уже накоплено так много углекислого газа, что он будет продолжать довольно долго создавать высокий уровень температуры. Океан уже прогрелся весьма ощутимо, и его влияние на климат и атмосферу тоже будет сказываться в течение 100 лет, а то и более. Несмотря на то, что мы можем отключить это явление, изменения в температуре не произойдут, однако и их прироста не будет. Если мы работаем в рамках сценария 8.5, то мы наблюдаем рост в температуре.

Каждая кривая погружена внутрь определенного интервала (они создаются данными различных моделей климата). Каждая модель климата имеет определенную чувствительность: она «шумит» по-своему, этот «шум» разный, и он создает разную амплитуду. В итоге получается диапазон возможных состояний, что нужно обязательно

учитывать. Примерно до середины столетия интервалы кривых перекрывали друг друга, и это означает, что мы не очень понимаем, по какому сценарию идет развитие климата. Только начиная с середины столетия эти кривые начинают принципиально расходиться. Если мы даже совершенно по-разному будем работать в мире с выбросами углерода, то мы увидим реакцию климата только к 2050 году. По разным сценариям мы уже ушли далеко вверх или вниз, но разность в отклике климата между ними все равно остаются примерно незаметными, несмотря на то что эти сценарии столь разные. Если рассматривать самый жесткий сценарий, то произойдет изменение глобальной температуры на 4 градуса. Парижское же соглашение предполагает, что нужно стараться не превысить 2 градуса, а то и 1,5 градуса.

### **Географическое распределение температур и осадков.**

Потепление будет наблюдаться в любом сценарии. Лучше нагреваются материки, хуже - океаны. Лучше нагреваются высокие широты в Арктике, в которых достигаются очень большие изменения, составляющие 10 градусов.

Мы сопоставляем климат современный с климатом, возмущенным в соответствие с теми сценариями, которые мы задаем. В современном климате в зимнее время в Арктике поверхность океана покрыта льдом и над этим льдом формируются температуры такие же, как над континентом ( $-30^{\circ}\text{C}$ ). Если мы представим в соответствии с прогнозами, что при потеплении климата происходит уменьшение льдов, то получается, что вместо ледяного массива значительная часть океана оказывается открытой, а если она открыта, то его температура будет уже  $-2^{\circ}\text{C}$ . Есть и аномалия - пятнышко в южной части Гренландии - которая характеризует то, что в этом районе очень ослаблены процессы глобального потепления. Смысл в том, что эта климатическая система преподнесла такой сюрприз, что термохалинная циркуляция в Атлантике, ответственная за перенос тепла, ослабляется при потеплении климата. Происходит перенос тепла и в атмосфере, и в океане из низких широт в высокие, интенсивность этого переноса в океане ослабляется в связи с общим потеплением климата. Мы можем это явление констатировать, не разбирая его на отдельные фрагменты. Из-за того, что перенос тепла в Атлантике ослабевает, получается некое пятнышко в районе Гренландии, где не происходит такое сильное потепление, как в других местах.

В умеренных широтах количество осадков увеличивается, а в Атлантике, в Тихом океане, в Средиземноморье уменьшаются. В Средиземноморье температуры будут увеличиваться, а количество осадков будет убывать. Следовательно, страны Средиземноморья при изменении климата движутся в сторону засушливых условий. Для Восточно-Европейской равнины дать такого типа прогноз без количественных

оценок очень трудно, потому что температура увеличивается, но увеличивается и количество осадков.

В настоящее время происходит **убывание площади морских льдов** в Северном полушарии. Помимо уменьшения площади происходит и уменьшение возраста льдов, то есть предполагается, что льдов возрастом до 5 лет становится гораздо меньше, а остаются только двухлетние льды. По сценарию 8.5 к середине столетия Арктика очистится ото льдов. По сценарию 2.6 ситуация не такая жесткая, лед останется, но уменьшение льдов все равно будет весьма существенным. Еще один показатель - **кислотность морской воды**. Эта величина зависит от растворимости углекислого газа в морской воде. По сценарию 8.5 будет происходить уменьшение кислотности, по сценарию 2.6 ситуация не так критична. Экологи утверждают, что некоторые живые системы не выдержат этих изменений.

На данный момент уровень Мирового океана поднимается, и срабатывают 2 фактора: термическое расширение воды и добавление в океан той воды, которая была в ледниках. Эти процессы будут продолжаться и в будущем. Уровень воды поднимется примерно на полметра.

### **Международные протоколы.**

Для недопущения катастрофических изменений климата применяются усилия, чтобы уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу. По **Киотскому протоколу** Евросоюз должен был сократить выбросы на 8 %, США на 7 %, Япония и Канада на 6%, страны Восточной Европы и Прибалтики в среднем на 8 %, Россия и Украина - сохранить среднегодовые выбросы в 2008-2012 годах на уровне 1990 года. Развивающиеся страны, включая Китай и Индию, обязательств не брали. Во время работы этого протокола содержание углекислого газа в атмосфере не уменьшилось. Это случилось, потому что те нормы, которые были заложены, были выполнены не до конца. Кроме того, сами цифры были очень маленькие. Также было принято **Парижское соглашение** - соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулирующие меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020 года.



## Лекция 22

### Климатически обусловленные природные ресурсы: прогноз на 21 век.

Климатически зависимые сферы экономики — это сельское хозяйство, транспорт, гидроэнергетика и так далее. Есть целый ряд направлений в экологии человека и экологии растений, связанных с климатом. В каждом случае из климатических данных можно выбрать те, которые являются фактически ресурсами. Как правило, эти величины являются производными от обычных климатических параметров: от температуры и осадков. Обратим внимание на одно обстоятельство: мы не всегда можем охарактеризовать все ресурсы, потому что ресурс, относящийся к определенной сфере экономики, может зависеть от таких показателей, которые или плохо измеряются, или плохо моделируются. В этом смысле существуют большие принципиальные ограничения. Мы должны строить функции, которые описывают ресурсы, исходя из тех параметров, которые хорошо известны, а хорошо известна **температура**. Хорошо известны её аномалии, её прогнозирование считается надежным. Следующий параметр — это **осадки**. Этот параметр важный, но пока доверие к модельным аномалиям осадков гораздо ниже, чем к модельным аномалиям в температуре. Приходится использовать осадки, но уже с большой долей понимаемой неопределенности. Говоря о сельском хозяйстве, было бы очень полезно использовать, например, влагосодержание почвы, но на самом деле эта величина воспроизводится с точки зрения её аномалии ненадежно, и поэтому включать её мы просто не можем. Получается довольно ограниченный набор всех показателей, которые мы применяем для описания ресурсов, и эта ограниченность связана с тем, что мы понимаем реально точность информации, которую предоставляют нам математические модели климата.

$$P = f(T, Prec)$$

Переходя к другим типам ресурсов, посмотрим на прогнозируемые изменения объема речного стока на середину 21 века. Мы входим в эти данные с информацией о том, что в южной части Восточно-Европейской равнины наблюдается отрицательная аномалия осадков и по всей территории наблюдается положительная аномалия температур. Подсчеты показывают, что если провести внутреннюю квази-параллельную широте линию через Москву, через центр Восточно-Европейской равнины, то всё, что находится севернее, не испытывает принципиально изменений с точки зрения современного состояния речного стока. Оказывается, что дополнительное количество воды в виде осадков, в конечном счете попадающее в реки, компенсируется тем испарением из бассейнов, которое связано с повышением температуры. В южной части происходит сильное изменение стока рек. В Западной Сибири в отличие от Восточно-Европейской равнины отклик небольшой, только в южных частях имеется некоторое изменение. Если сопоставить две карты, то можно понять, насколько сложна проблема прогноза климата. Два практически соседних региона, оба расположены на равнинной территории и оба близки по природным показателям, но они демонстрируют

совершенно разные отклики на глобальное потепление. На Восточно-Европейской равнине проявляется сильная межширотная чересполосица, а в Западной Сибири аномалия близка к нулю. При этом в рассмотрение не включён Урал по очень простой причине: в горах модельные данные несколько менее надежны, чем на равнинах. В прогнозируемых объемах стока половодья картину вполне естественная. Будет наблюдаться уменьшение стока половодья, кроме северо-восточных районов Восточно-Европейской равнины. Общее потепление приводит к тому, что снежный покров становится неустойчивым, и запасы снега, которые обычно формируются к весне и затем быстро тают, становятся меньше. Соответственно, вырастает значение стока рек в зимнее время и уменьшается объем стока в половодье. Это входная информация и в гидроэнергетике, и в проблеме качества воды, и в экономических проблемах, связанных с водохранилищами.

Следующий пример связан с многолетней мерзлотой. Инженерный анализ в данном случае заключается в том, что все сооружения, которые есть в вечной мерзлоте, базируются на некоторых сваях, вбитых в грунт. Здесь имеют место две проблемы:

- 1) если уменьшается мощность замёрзшей породы, то несущая способность свай уменьшается. Если процесс идёт по типу RCP 8.5, то к концу столетия на каждые четыре сваи надо будет добавить ещё одну.
- 2) когда наступает лето, происходит оттаивание многолетней мерзлоты, а осенью с наступлением холодов снова происходит замерзание. Замерзание происходит неодинаково по всей площадке, окружающей сваю. Из-за этого разные фрагменты трубы испытывают напряжение, направленное в разные стороны, то есть имеется стремление криогенных сил эту трубу искривить. Этот эффект известен уже 100 лет и принимается во внимание. Однако, когда наступило потепление климата, увеличивается глубина слоя оттаивания, и действие этих сил становится очень большим. Из-за незапланированного влияния сил криогенного пучения происходят разрушения в домах, путепроводах, мостах и так далее.

Казалось бы, всем понятно, что заболеваемость у человека в сильной степени зависит от погоды и климата. Однако существует очень мало заболеваний, интенсивность которых можно параметризовать в зависимости от погодных условий. Одним из таких заболеваний является малярия. Для того, чтобы произошло вызревание возбудителя, нужно, чтобы поддерживалась тёплая температура без перерывов на похолодание. Если по данным метеорологических станций или по данным математического моделирования выбрать интервал, когда накапливается определённая сумма температур, начиная с некоего положительного значения, и это накопление происходит без каких-то резких похолоданий, то мы вправе ожидать появления малярии. Когда это было установлено, то стало понятно, что малярия – это та болезнь, изменение ареала которой можно достаточно просто параметризовать, если иметь в виду глобальное потепление климата. Состояние ареалов распространения характеризуется показателем

вероятность передачи малярии. Это величина, ограничивающая области с типично развивающиеся малярией и области её отсутствия. В ответ на потепление климата опасность малярии захватывает всё более и более северные районы. На основе менее надежных данных говорят о связях потепления с энцефалитным клещом. В настоящее время клещи распространяются всё севернее и севернее, но их жизненный цикл не имеет прямой зависимости от изменения климата.

Следующим примером является то, что мы наблюдаем уже в настоящее время. Это изменение удельного прироста древесины. В условиях холодных климатов при потеплении и при сохранении достаточного уровня увлажнения биопродуктивность будет увеличиваться. Если смотреть с юга на север, в лесной полосе Восточно-Европейской равнины происходит переход от широколиственных лесов и лесостепей через в тайгу в тундру и в арктическую пустыню. Растительностью связана с климатом, и это обстоятельство послужило Кёппену в классификации климатов. В качестве главной характеристики он как биолог выделял тот или иной тип растительности. При изменении климата (если изменения поддерживаются достаточно долго) растительность должна измениться и приспособиться к новым климатическим условиям. С другой стороны, должен измениться весь комплекс, а ландшафтный комплекс обладает длительным запасом устойчивости, и если вывести его из состояния равновесия, то для перехода в новое состояние равновесия ему понадобятся (в зависимости от типа) десятки и первые сотни лет. Следовательно, ожидать, что при потеплении климата растительность сразу отреагирует и перестроится соответствующим образом, мы не можем. Если бы климат пришел в состояние середины столетия и находился в этом состоянии так долго, что этого было бы достаточно, чтобы произошла перестройка растительных сообществ, то ландшафтные комплексы начали бы смещаться к северу. Окончательно понять, что будет с растительностью, очень трудно. Если представить себе, что климат и растительность были бы в согласованном состоянии, то современное быстрое потепление климата приведет к тому, что растительный покров окажется типичным не в своих условиях.

В сельском хозяйстве ситуация более простая. Мы ожидаем, что в холодном климате в ответ на потепление термические пояса будут смещаться к северу, и привязанные к этим поясам увлажненность и виды сельскохозяйственной специализации тоже будут смещаться к северу. Создается радужное впечатление, что и лён, и сахарная свёкла, и стада крупного рогатого скота двинутся к северу и захватят новые территории. Природа дает нам шанс, чтобы это получилось, но для реализации нужны определенные финансовые вложения, переходя на другие формы специализации. Изменение климата в положительную сторону всё равно, по крайней мере в краткосрочной перспективе, имеет негативный характер, потому что требует изменений, вложений и создает нестабильность.

Ресурс, который касается транспортной сферы, — это зимние дороги. Как только зима вступает в свои права, то, учитывая замерзание многих рек, на водных путях

устанавливается движение автотранспорта, которое работает до весны. Когда происходит потепление климата, вся эта инфраструктура находится под угрозой.

### **Климатическая уязвимость и риск.**

Подход, связанный с климатической уязвимостью и рисками климатических изменений, устроен не так, как методология, к которой мы привыкли. До сегодняшнего момента мы смотрели на изменение климата и на тот отклик, который происходят на хозяйство и на экологию. Изменение климата вызывает изменение температуры и осадков, и это определяет воздействие на регион. К этому можно подходить таким образом, что мы априорно, заранее для какого-то региона выбираем те факторы, которые делают его наиболее уязвимым, а затем смотрим, что с этим фактором происходит. Например, для столицы Филиппин Манилы наиболее опасный природный фактор — это тайфуны. Дальше строится цепочка связей, которая показывает, в чём заключается опасность и какие могут быть изменения. Для Москвы в летнее время наиболее опасные вещи — это волны тепла. В таком же ключе мы априорно говорим, что Москва уязвима, и рассматриваем те факторы, которые эту уязвимость определяют. **Риск** составляется из разнокачественных влияний: уязвимости, опасности и времени экспонирования. На пересечении всех этих трёх множеств мы получаем определенный риск к тому или иному событию, фактору или процессу. Например, Москва уязвима к тропическим ураганам, они опасны, но в Москве этого не бывает, то есть время экспонирования равно нулю. Следовательно, риска к тропическим ураганам в Москве нет. Манила уязвима к тропическим ураганам, они опасны и бывают в этом регионе, поэтому риск для Филиппин связан с тропическими ураганами. Предположим, что в Манилу придёт похолодание до сильно отрицательных температур, и уязвимость Манилы будет огромна. Однако такого не бывает, поэтому никакого риска к похолоданиям в Маниле нет.

Посмотрим более внимательно на Москву. В Европе в летнее время главный фактор, определяющий опасность к природным процессам, — это волны тепла. Они представляют собой аномалии температуры выше определенного предела, которые поддерживаются в течение 5 и более дней. Эти аномалии связаны с долгоживущими антициклонами и явлениями блокирования западного переноса. В печально знаменитом 2010 году область высокого давления существовала 44 дня. С точки зрения метеорологии существует тонкость, которая заключается в том, что стабильный, стационарный вихрь на самом деле живой, и за эти 44 дня он 7 раз обновлялся. В антициклоне развиваются высокие температуры за счёт малооблачной летней погоды, хорошего притока солнечной радиации и потоков воздуха с юга. Высокие температуры и отсутствие осадков приводят к сердечно-сосудистым заболеваниям, а наблюдающаяся жара и сухость приводят к пожарам. Горят леса, торфяники, увеличивается загрязнение атмосферы, и возникают респираторные заболевания. Возникает определенный синергизм воздействия волн тепла и особенностей городского климата, то есть в городе жара переносится гораздо тяжелее, чем вне его. Итогом были

человеческие жертвы и экономический ущерб. В Маниле мы имеем тоже человеческие жертвы и экономический ущерб, но только всё это связано с явлением другого типа.

### **Геоинжиниринг: технологии «спасения» климата.**

В ответ на изменения климата нужно пытаться проводить мероприятия, направленные на смягчение происходящих изменений и адаптацию к ним. Этому посвящены протоколы, о которых шла речь. Существует еще и кардинальная идея, которая связана с тем, что можно попытаться климат спасти. Эта наука называется **геоинжиниринг**. В последнее время этот термин чаще всего применяется для глобального климата. По этой теме идей довольно мало, и все они, кроме одной, практически не разработаны. Ещё одно их общее свойства — это то, что эффекты совершенно не просчитаны, и неизвестно, что будет при этом с экологией, с водной средой, с растениями и вообще с нашей жизнью.

Земля от Солнца расположена очень далеко, и телесный угол, который занимают Земля и Солнце, очень маленький, и поэтому, если мы хотим перекрыть солнечное излучение и каким-то образом его контролировать, то это сделать это не так трудно, как могло бы показаться. Оказывается, что можно поставить космический зонтик в такой точке между этими двумя небесными телами, что если разместить объект, то он так и будет в этой точке находиться всегда. Солнце немножко покачивается, Земля вокруг него делает оборот за оборотом, а этот экран будет находиться всегда в нужном месте. Если поставить экран, то вся Земля погрузится в тень и сразу станет холодно, а если его чуть-чуть приоткрыть, то сразу будет немного теплей. Из всех планируемых проектов геоинжиниринга он самый дорогой.

Следующий проект связан с вопросом об обратных связях, которые происходят в климатической системе. Если происходит глобальное уменьшение температуры, то за счёт целой цепочки процессов происходит уменьшение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, а уменьшение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере через парниковый эффект усиливает ещё больше уменьшение температуры. Если занести в океан ионы железа, то при этом будет бурно происходить развитие фитопланктона. Из морской воды углерод в процессе фотосинтеза уходит на развитие фитопланктона, нарушается баланс между содержанием углерода, растворенного в воде и атмосферного углерода в виде  $\text{CO}_2$ , и из-за нарушения баланса дополнительное количество  $\text{CO}_2$  уходит в воду, отсасывается из атмосферы. Дальше отмерший фитопланктон оседает на дно и создает донные отложения, то есть получается, что должен работать биологический насос, который высасывает избыток углерода из атмосферы и складывает его на дне океана. Условно говоря, мы верим в этот процесс, но на масштабах в тысячи лет. Наши расчеты основаны на моделях климата и глобального биогеохимического цикла, но если нам надо погасить глобальное потепление прямо сейчас, то этот механизм неэффективен. У этой идеи практически нет количественных оценок и не известны экологические эффекты.

Ещё один эффект — это управление оптическими свойствами слоисто-кучевых облаков. Речь идёт об облаках над океаном. В субтропиках располагаются весьма стабильные антициклоны, которые называются субтропические антициклоны, например, Азорский, Гавайский. В перифериях этих антициклонов, обращенных к западным побережьям материков, то есть в Атлантике это африканский берег, в Тихом океане - это калифорнийский берег, в Южном Тихом океане - это Чили и Перу, и там создаются довольно тонкие, но занимающие огромное пространство, поля слоистых и слоисто-кучевых облаков. Если антициклон находится в Южном полушарии в Южном Тихом океане, то холодный воздух всё время движется к северу, к экватору, и гонится холодная вода Перуанского течения. Здесь происходит апвеллинг, то есть близко к поверхности выходят холодные воды, поэтому температура воды снижена и образуются обширные области слоистых и слоисто-кучевых облаков. Так происходит около Перу, Марокко, Калифорнии и так далее. Слой облаков в толщину небольшой – около 300-400 метров, но облачность обладает очень большой оптической плотностью, и наличие даже таких тонких облаков приводит к тому, что прямая радиация сквозь них не проходит. Из-за этого на побережье Перу температура не поднимается выше +16°C, всё время сыро и идёт мелкий дождь, хотя до экватора относительно недалеко. Возникла идея попробовать менять оптические свойства облаков в сторону увеличения оптической толщины и альбедо. Если сделать их еще более яркими, еще большее количество радиации будет от них отражаться и уходить в космос. Это повлияет не только на региональный, но и на глобальный баланс тепла. Если в этих облаках будет больше ядер конденсации, то будет больше капель и оптическая толщина облаков увеличится, что может привести к снижению глобальной температуры. Чтобы увеличить количество ядер конденсации, нужно внизу взбалмутить воду. В приводном слое атмосферы всегда существуют вертикальные токи, то поднявшиеся в воздух капли подхватываются восходящими потоками и унесутся в слои, где формируется облачность.

Есть и локальные идеи: улавливать на каждом заводе то, что выбрасывается, а дальше отобранный CO<sub>2</sub> закачивать в землю.

Определенная практическая идея возникла ещё у Михаила Ивановича Будыко в семидесятых годах, когда он мощно продвинулся в понимании генезиса изменения климата, моделирования климата, которая нашла продолжение в современное время. Если мы хотим бороться с потеплением, то можно идти по тому пути, который подсказывают нам крупные вулканические извержения. Когда из вулкана происходит выброс, то та часть, которая находится в тропосфере, очень быстро исчезает, потому что вымывается осадками или оседает при нисходящих движениях воздуха. В части, расположенной на высоте от 10 до 30 км, газ SO<sub>2</sub> превращается в капельки H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> за 5-7 суток под влиянием фотохимических процессов. Далее облако, постепенно диффундируя в горизонтальной плоскости, экраном покрывает Землю, что действительно приводило к определённым похолоданиям. В 1991 году через несколько месяцев после извержения вулкана Пинатубо температура понизилась примерно на 0,6-

0,8°C. Экран живёт на протяжении 2-3 лет и постепенно исчезает, и температура постепенно выравнивается. Возникла идея попробовать реализовать этот эффект. Нужно доставить в стратосферу серу, и предполагается, что можно это делать на высокопотолочной авиации. Серы на Земле много, и есть огромные участки, где она складывается. Оказалось, что перебросить серу в стратосферу — это не очень дорогое мероприятие. Уже сделаны расчеты по изменению температуры без данного эффекта и с ним. Более того, уже даже намечены точки, где удобнее всего сделать взброс для того, чтобы разбрасывать это вещество наиболее эффективно по горизонтали. При этом возникает интересный геофизический феномен. Глобально температура снизится, но региональные изменения получаются неожиданными. Предполагается, что в ответ на глобальное уменьшение температуры все регионы на Земле вернуться в свой доиндустриальный климат, но этого происходить не будет, и климат станет немного другой. Где-то возникнет необычная аномалия засушливости, где-то появятся волны тепла, в каких-то районах вдруг пройдут тропические ураганы. Глобальное возвращение на прежний уровень, оказывается, совершенно не гарантирует регионального возвращения. Еще одна идея, общая для всех подобных технологий, - это отсутствие хоть какой-то проработки экологических эффектов, потому что в конечном счете серная кислота будет оседать внизу на растительность, на экосистемы, на экосистему в океане, на людей. Пока в мире к геоинжинирингу относятся с определенным скептицизмом, который отражается документах Парижского саммита, где этого слова нет. По-прежнему идет речь об адаптации и смягчении, а геоинжинирингом пока занимаются только некоторые энтузиасты.

## Лекция 23

### Сюрпризы глобального потепления.

В любой науке, в том числе и в науке об изменении климата, наступает период общего понимания ситуации. В мировом сообществе начинают понимать, что в научном, фундаментальном плане все стало ясно, поэтому остается только работать над улучшением качества моделирования и прогнозов. Последний раз такая ситуация возникла на рубеже столетий, когда казалось достаточно понятным, как идет потепление и тому подобное. Однако оказалось, что не все так просто. Под сюрпризами будем иметь в виду то, что процесс глобального потепления иногда демонстрирует такие механизмы, о которых никто раньше не подозревал.

Первым сюрпризом, связанным с глобальным потеплением, оказалась **пауза в глобальном потеплении**. Подобного никто не ожидал. Иллюстрацией второго сюрприза можно считать кинофильм «Послезавтра», который оказал сильное влияние на наше общество вплоть до того, что выдержки из него цитировались на крупных международных конференциях. Современные модели демонстрируют то, что **термохалинная циркуляция в Северной Атлантике ослабевает**, а вместе с ней ослабевает и приток тепла в высокие широты. Этот сюрприз также требует своего осмысления.

Следующий сюрприз – это **холодные зимы в Европе**. В 2012 году замерзла Венеция. Женевское озеро не замерзло, но восточные ветры, которые наблюдались в то время, разгоняли хорошую волну, прибой выбрасывал воду на набережную Женевы, и все набережные были покрыты слоем льда. Также отмечалось падение температур до  $-15^{\circ}\text{C}$ , что очень холодно для Женевы. Оказывается, что такое происходит из-за глобального потепления. Глобальное потепление в определенном регионе может сопровождаться похолоданием. Тут нет противоречия, потому что физические явления связаны с масштабами. Когда мы рассматриваем Землю в целом и физику изменений климата на всем земном шаре одновременно, мы надежно оперируем такими понятиями, как увеличение количества углекислого газа в атмосфере, усиление парникового эффекта, и в ответ на это получаем рост температуры. Если мы уменьшаем область нашего интереса сначала до размера континентов, потом до размеров отдельных регионов и далее размеров урбанизированных территорий, то, чем меньше масштаб, тем большую роль начинает играть в физике изменений климата данной территории циркуляция атмосферы или океана. Во всех случаях мы рассуждаем с точки зрения теплового баланса. Когда рассматривается планета в целом, то эффект переноса тепла циркуляционными механизмами исчезает, а в отдельных регионах наблюдается приток тепла, связанный с системами циркуляции. Эти системы циркуляции чувствуют глобальное потепление, то есть глобальные изменения влияют на глобальное поле температуры и давления, которое в свою очередь влияет на общую циркуляцию атмосферы. ОЦА влияет на региональные циркуляции, а климат какого-то



региона находится под контролем региональных циркуляций и глобального поля температуры и давления. Искать причину зимних похолоданий в Европе с точки зрения глобального потепления надо в изменении циркуляции атмосферы. В этом явлении определяющую роль играет потепление Арктики. Из-за того, что Арктика теплеет очень быстро, нарушаются привычные условия циркуляции атмосферы в умеренных широтах.

8 февраля 2012 года над севером Восточно-Европейской равнины и частично над Скандинавией устанавливается область высокого давления, а по ее периферии тепло распространяется на Баренцево море. Потепление Арктики происходит главным образом через Баренцево море. На карте распределения температуры язык тепла протягивает вплоть до архипелага Земля Франца-Иосифа. 8 февраля на Земле Франца-Иосифа температура поднялась выше нуля, что бывает очень редко. По периферии циклона и антициклона происходит движение тепла, а с другой стороны антициклона наблюдаются восточные потоки. В середине Восточно-Европейской равнины и дальше в Западной Европе происходит восточный перенос. Похолодание в Европе связано с воздушными массами, пришедшими не с севера, а с континента. Это континентальный умеренный воздух Западной Сибири, который по периферии антициклона двинулся в Европу. Такое распределение давления получилось как реакция на то, что в высокие широты все время забрасывается тепло. Потепление Баренцева моря приводит к перестройке всего режима. В теплом воздухе расстояние между изобарическими поверхностями больше, чем в холодном, поэтому изобарические поверхности наклонены из низких широт в высокие. Из-за этого возникает барический градиент, частицы воздуха приходят в движение, на вращающейся Земле сила Кориолиса отклоняет их, и получается западное движение воздуха. Если наклон изобарической поверхности уменьшается, то западный перенос ослабевает. Там, где обычно было холодно, в высоких широтах становится тепло, и барическая поверхность из-за этого несколько распрямляется. Уменьшается поступление воздуха с запада из Атлантики, и он замещается теми потоками, которые приходят с востока.

Главной модой изменчивости является Североатлантическое колебание, которое управляет циркуляционным режимом Атлантики и Европы. Это колебание имеет положительную и отрицательную стадии. Карты, на которых изображены области высокого и низкого давления, можно проанализировать, направив анализ на выделение общих черт. Выделяются типичные картины распределения атмосферного давления, а значит, типичные картины атмосферной циркуляции. Таким образом мы выделяем наиболее значимые картины, и одной из них является Североатлантическое колебание. В положительную фазу идет мощный поток с Атлантики, в отрицательную фазу этот поток становится слабым. В 2012 году преобладала отрицательная фаза колебания. Когда Североатлантическое колебание ослабевает, то на его место в качестве главного управляющего механизма выходят другие механизмы, например, Скандинавская картина (SCAND). Над Скандинавией и над Баренцевым морем из-за аномалии

высокого давления вместо режима NAO появляется режим SCAND. По периферии антициклона начинается движение воздуха с Баренцева моря на материк, а в центре Азии давление низкое. Когда господствует SCAND, то появляется аномалия типа 2012 года, когда холодные воздушные массы подхватываются и из Западной Сибири движутся в Европу, вызывая необычные похолодания. Так происходит потому, что изменяется наклон изобарических поверхностей. Зимой этот наклон должен увеличиваться, вызывая сильный западный перенос, а вместо этого получается некоторое его выравнивание. Увеличение изобарических поверхностей в Арктике связано с ее прогреванием. В Арктике температуры меняются эффективней, чем в среднем по всему земному шару. Даже в удвоенном случае глобальные аномалии не такие интенсивные, как то, что наблюдается в Арктике.

То, что сейчас происходит с Баренцевым морем, - потепление, уменьшение площади льда, изменение свойств самого моря – это так называемая «атлантификация». Это море, которое раньше явно представляло собой часть арктического бассейна, постепенно становится частью Атлантического океана. Это связано с тем, что в него интенсивно начинают входить атлантические водные массы. Следствием вхождения теплой и более соленой атлантической воды является увеличение запасов тепла. В последние годы на фоне флуктуаций идет несомненный тренд увеличения запасов тепла. Уменьшается площадь льдов. Из-за увеличения притока тепла над Баренцевым морем развивается циклон. Над холодными «пятнами», наоборот, стремятся развиваться антициклоны. Над более теплым морем в циклоне происходит вращение против часовой стрелки и усиливаются западные потоки воздуха, которые тащат воду из Атлантического океана. Это дрейфовая циркуляция, один из главных механизмов движения вод в морях и океанах. Происходит дополнительный приток тепла в океане, уменьшается площадь льда, то есть возникает система обратных связей между циркуляцией атмосферы и морской циркуляцией в системе Северная Атлантика – Баренцево море. Эта картина реализуется не всегда, когда вода из Атлантики может не пойти в Баренцево море.

Осмысление сюрпризов приводит к тому, что происходит прогресс в исследованиях. Старые представления или уходят, или сильно модифицируются. Уменьшение снежного покрова приводит к уменьшению альбедо, что в свою очередь приводит к росту радиационного баланса и росту температуры, что вызывает дальнейшее уменьшение снежного покрова. Такая обратная связь не отменяется, но по современным представлениям и количественным оценкам, эта связь не является главной. Новая концепция заключается в идее положительной обратной связи между океаническим притоком в Баренцево море и льдом. Начиная примерно с 1980-х по 1997 годы, наблюдается преобладание положительной стадии Североатлантического колебания. Тогда это привело международное сообщество к идее, что в ответ на глобальное потепление общая циркуляция атмосферы меняется таким образом, что происходит усиление NAO<sup>+</sup>. Казалось бы, получилось эмпирическое правило, однако

затем началась эпоха, когда Североатлантическое колебание не было выражено ни в минус, ни в плюс. Вместо NAO начал работать механизм SCAND, а потом появились отрицательные стадии, которых стало не меньше, чем положительных. Теория о том, что циркуляция атмосферы реагирует на антропогенное воздействие, не подтвердилась. Мы имеем данные наблюдений, которые сами по себе объяснить физику явления не могут. Мы имеем данные глобальных моделей земной системы, которая устроена так сложно, что понять физику выходного сигнала тоже очень трудно. Необходимо понять, какие механизмы работают в реальности, а какие производят математические модели, и нужно добиваться того, чтобы эти механизмы были одинаковыми.

Есть ли повсеместное влияние на климат умеренных широт?

Из глобального потепления следует феномен потепления Арктики. За счет уравнения статики барическая поверхность наклонена от экваториальных широт к полярным. При потеплении Арктики поверхность выравнивается, барический градиент уменьшается, западный перенос ослабевает. С другой стороны, глобальное потепление вызывает потепление и в тропиках, и там стратификация атмосферы гораздо ближе к неустойчивости. Из-за этого возникает конвекция, и тепло переносится вверх. Таким образом, вверх поднимаются обе части барической поверхности: и та, которая ближе к полюсу, и та, которая находится в тропиках, то есть барический градиент остается таким же. Интенсификация конвекции в тропиках приводит к тому, что там изобарические поверхности поднимаются вверх, что усиливает западный перенос в умеренных широтах, а потепление Арктики его уменьшает. Анализ циркуляционных систем, который выполняется по всему Северному полушарию, показывает, что принципиальных изменений нет. В регионах изменения происходят, а в целом по Атлантике или Тихому океану изменений пока что нет.



ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА



*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ