

# Прогноз погоды и климата: прошлое, настоящее и возможное будущее

**Александр Чернокульский**

*старший научный сотрудник Института физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской академии наук  
шеф-редактор телеканала «Первый Метео», сайта «Метео-ТВ»*

[a.chernokulsky@ifaran.ru](mailto:a.chernokulsky@ifaran.ru)



Data&Science: Погода  
Москва, Яндекс, 4 февраля 2017

# Основные вопросы

---

- Что такое погода?
- Как наблюдают за погодой?
- Как делают прогнозы погоды?
- Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?
- Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?
- Можно ли спрогнозировать погоду самому?



---

## • **Что такое погода?**

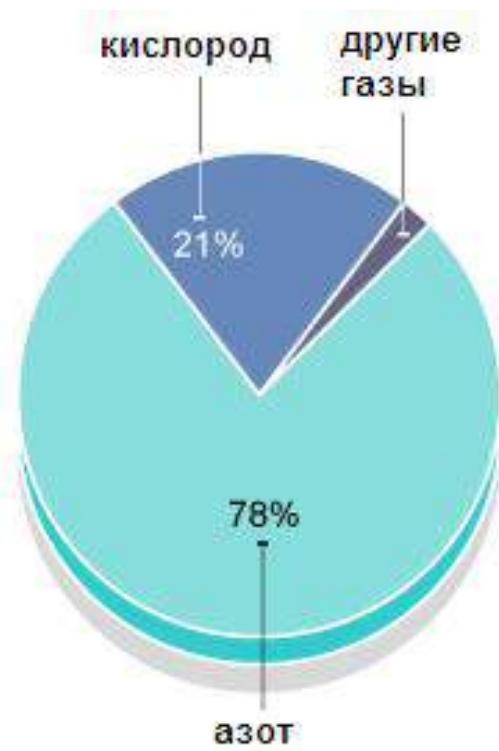
- Как наблюдают за погодой?
- Как делают прогнозы погоды?
- Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?
- Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?
- Можно ли спрогнозировать погоду самому?

# Что такое атмосфера?

Атмосфера (от. др.-греч. ἀτμός — «пар» и σφαῖρα — «сфера») – воздушная оболочка планеты (Земли), удерживаемая в поле гравитации.

Простирается атмосфера очень высоко, на тысячи километров, но основная её часть находится у Земли (десятки километров). Масса атмосферы около  $5 \cdot 10^{15}$  т (в  $10^6$  раз меньше, чем масса Земли).

Благодаря атмосфере на Земле есть жизнь: кислород необходим для дыхания, озоновый слой защищает от вредного УФ-излучения Солнца.



# Как выглядит атмосфера из космоса?

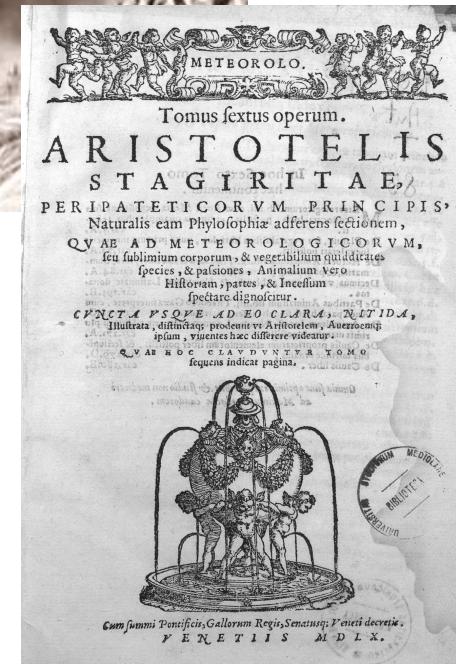
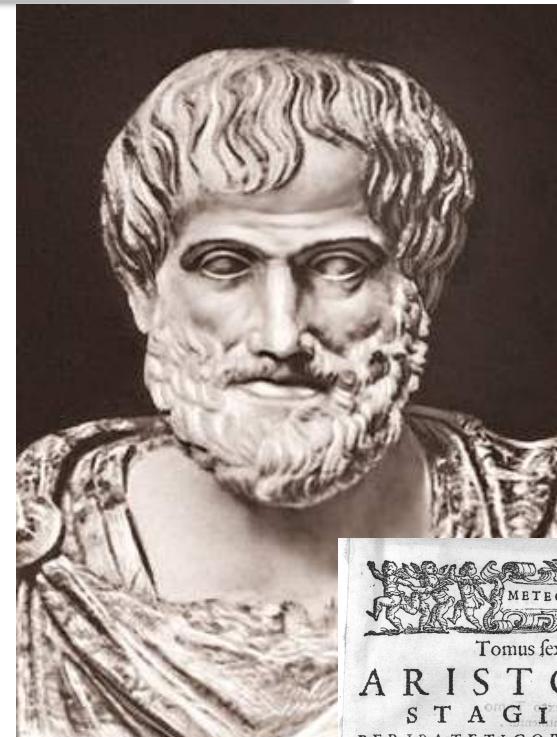


# Метеорология – это ...

**Метеорология** (от греч. μετέωρος, metéōros — атмосферные и небесные явления и -λογία — наука) — наука о строении и свойствах атмосферы (земной) и происходящих в ней физических процессах.

Первая работа по метеорологии — «Метеорологика», Аристотель, 800 лет до н.э.

Аристотель первым написал о погоде.



# Что такое погода?

Погода – состояние нижнего слоя атмосферы (нижней тропосферы) в определённом месте в определённое время.



**Место!**



**Время!**

# Что характеризует погоду?

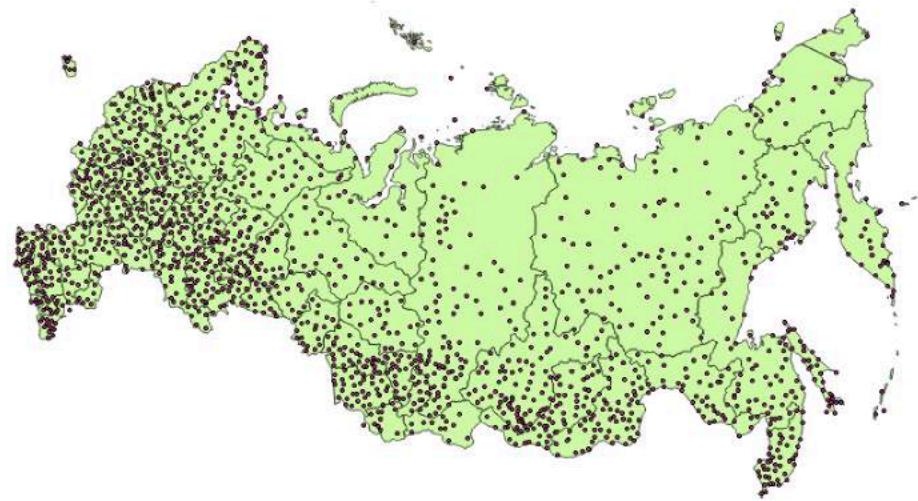
---

- Температура (минимальная, максимальная, в тени).
- Характер погоды (Качественная характеристика: солнечно, пасмурно, снег, дождь. Количественная: облачность, вероятность и интенсивность осадков, вероятность опасных явлений).
- Влажность воздуха (относительная и абсолютная).
- Атмосферное давление (текущее значение и тенденция).
- Ветер (среднее значение и порывы, откуда дует).
- Индексы комфорта (напр., ощущаемая температура).
- УФ-радиация (индексы, или, напр., время экспозиции, достаточной для получения суточной дозы витамина D).
- Специализированная информация (напр., высота нижней облачности, дальность видимости и т.д.)

- 
- Что такое погода?
  - **Как наблюдают за погодой?**
  - Как делают прогнозы погоды?
  - Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?
  - Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?
  - Можно ли спрогнозировать погоду самому?

# Как наблюдают за погодой: метеостанции

Наблюдения на станциях:  
погода у Земли



# Когда появились первые приборы?

Первый метеорологический прибор:

**Флюгер** (Афины, Древняя Греция, 50 год до н.э.)



Первый **термометр**:

Галилей (1597 г.), водяной термоскоп, без шкалы

Фаренгейт (1723 г.): ртутный термометр

Цельсий (1742 г.): привычная нам шкала, основанная на точках замерзания и кипения воды

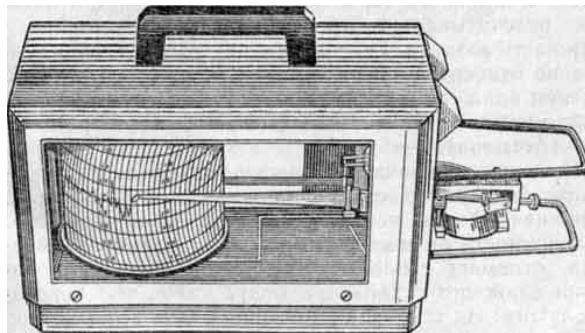
Первый **барометр**: 1643 год, Торричелли



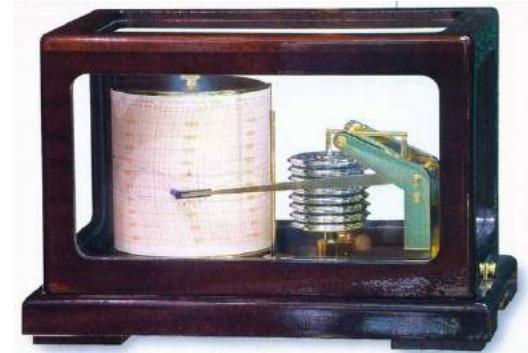
# Самописцы

Приборы совершенствуются: нужна запись постоянных изменений погоды. Появляются приборы-самописцы:

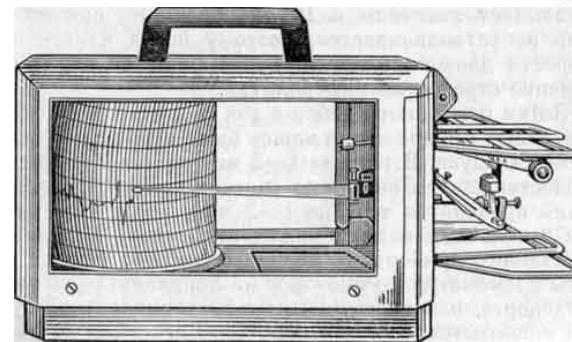
Термограф



Барограф



Гигрограф



В конце 20 века появляются  
автоматические метеостанции



# Первые станции и системы наблюдений

---

- 1654 – 1667 гг. академия дель Чименто,  
9 метеостанций (в основном Италия)
- 1723 – 1735 гг. вторая сеть метеостанций в Европе  
(наблюдения проводились по единой методике)
- 1733 – 1744 гг. первая сеть наблюдений в Сибири (24 станции)
- 1781 г. первое в мире метеорологическое общество  
(Мангеймское общество, 39 станций от США до Урала, 4 наблюдения в день – в 7, 11, 14 и 21 час)
- 1853 г. Метеослужба Великобритании (Первое в мире государственное метеорологическое ведомство)
- 1873 г. Первый международный метеорологический конгресс: единые сроки наблюдений, единый телеграфный код передачи данных

# Аэрологические наблюдения

Аэрология – изучение верхних слоев атмосферы.

Сначала – самописцы запускали на воздушных шарах. Затем появились змеи.

В 1930 году Павел Молчанов придумал **радиозонд**.



# Наблюдения на море

Наблюдения на кораблях – с середины 19 века.

В конце 20 века запускаются специальные буи:  
погода над океаном, в Арктике



# Наблюдения из космоса

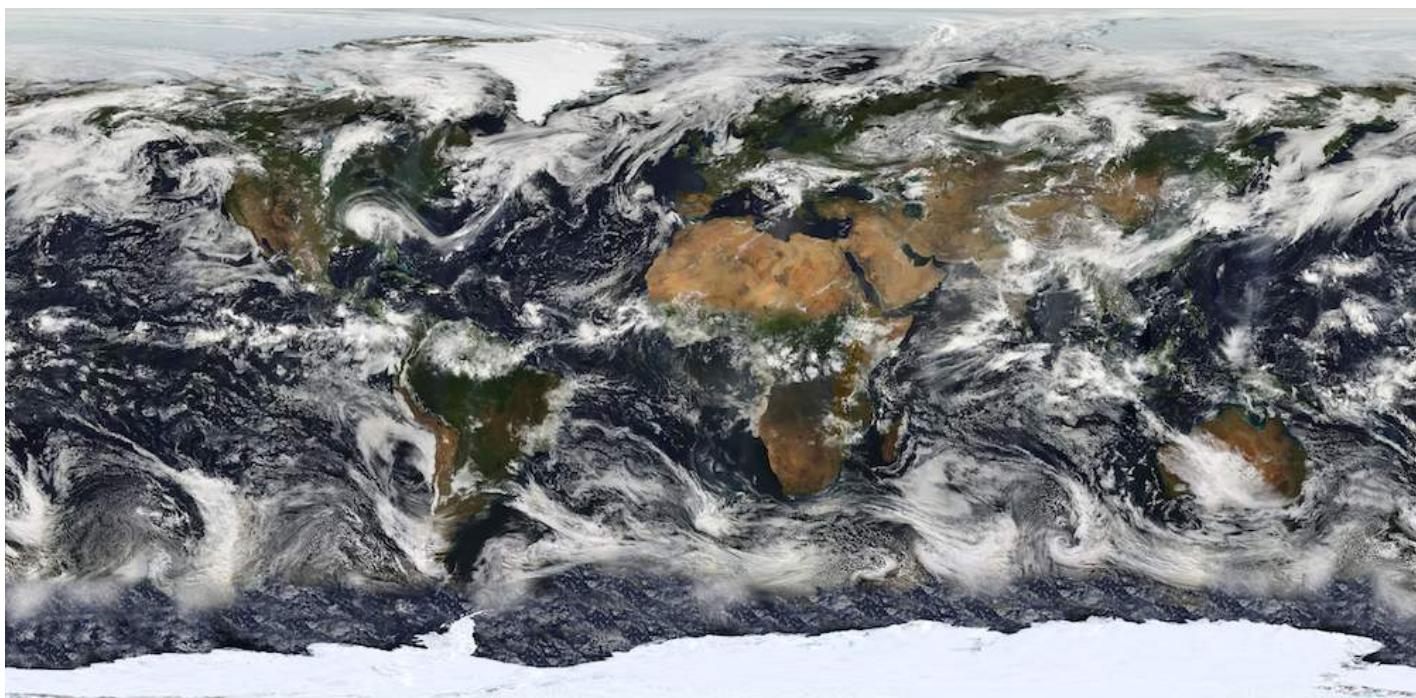
**Спутниковые наблюдения:** состояние атмосферы

на всех высотах во всех точках Земли.

Первый спутник: Спутник-1 (1957, СССР)

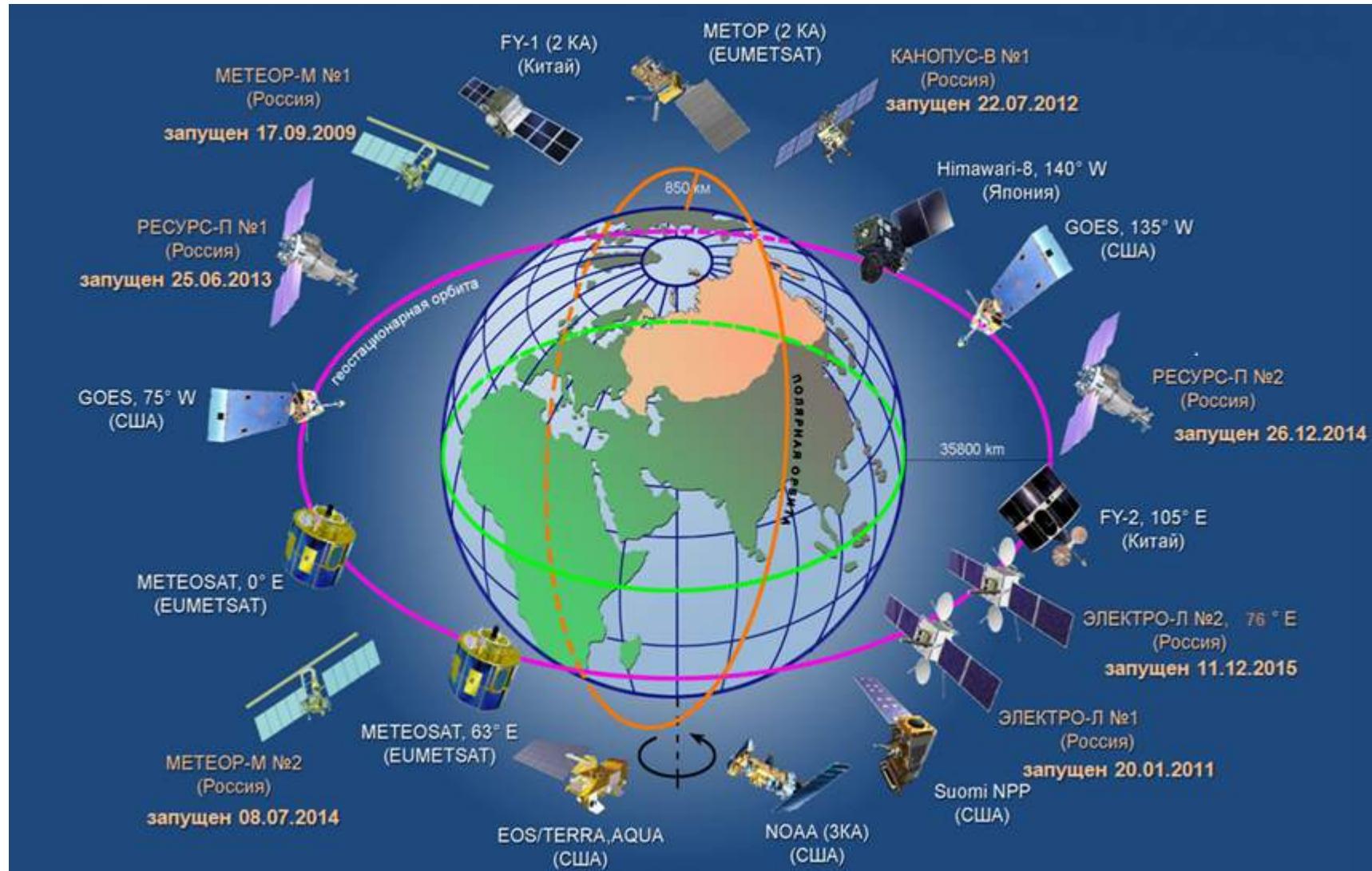
Первый метеорологический спутник:

TIROS-1 (1960, США).



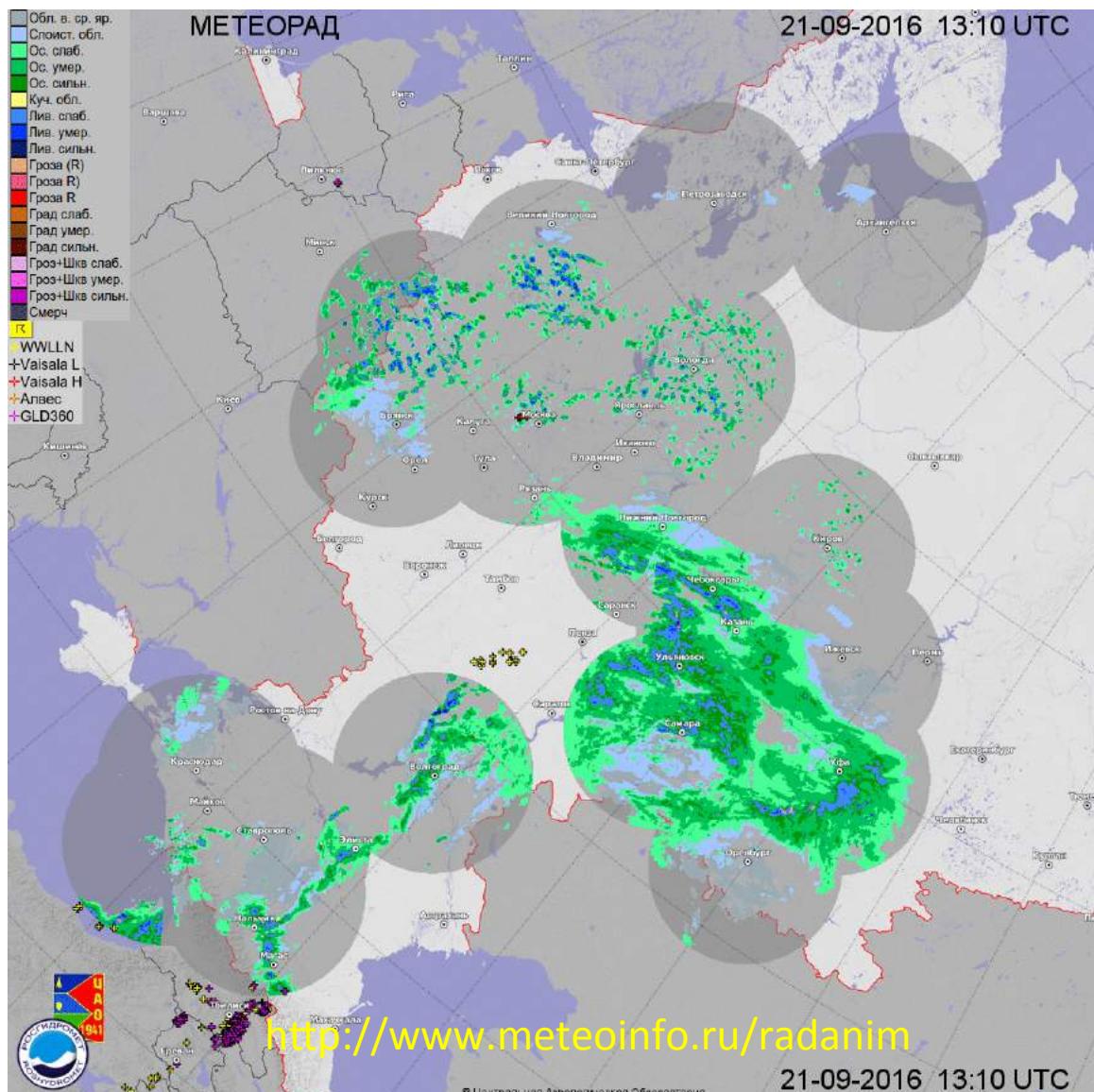
# Наблюдения из космоса

## Международная группировка спутников наблюдения Земли



# Метеорологические локаторы

**Допплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ):**  
Оперативная информация о фактической облачности, осадках и ветре в радиусе 150-200 км от локатора. Впервые: в США в 1950 г.



- 
- Что такое погода?
  - Как наблюдают за погодой?
  - **Как делают прогнозы погоды?**
  - Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?
  - Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?
  - Можно ли спрогнозировать погоду самому?

# Первые прогнозы погоды

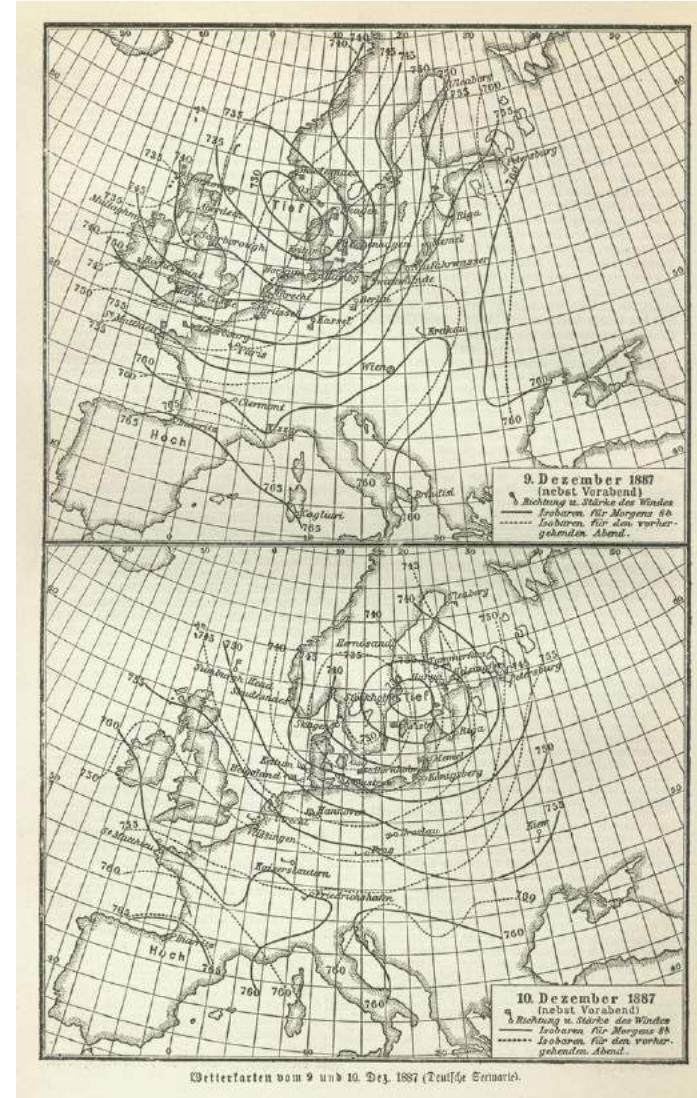
Попытки делать прогноз погоды – еще в Древней Греции, в Вавилоне

**1660 г.** – Первый успешный научный прогноз! Отто фон Герике на основе собственного барометра за 2 часа предсказал приближение бури.

**1859 г.** – начало использования погодных карт для предсказания погоды

**1917-1920 гг.** – Вильгельм Бьеркнес (Норвегия): теория фронтов. Циклоны, антициклоны, атмосферные фронты.

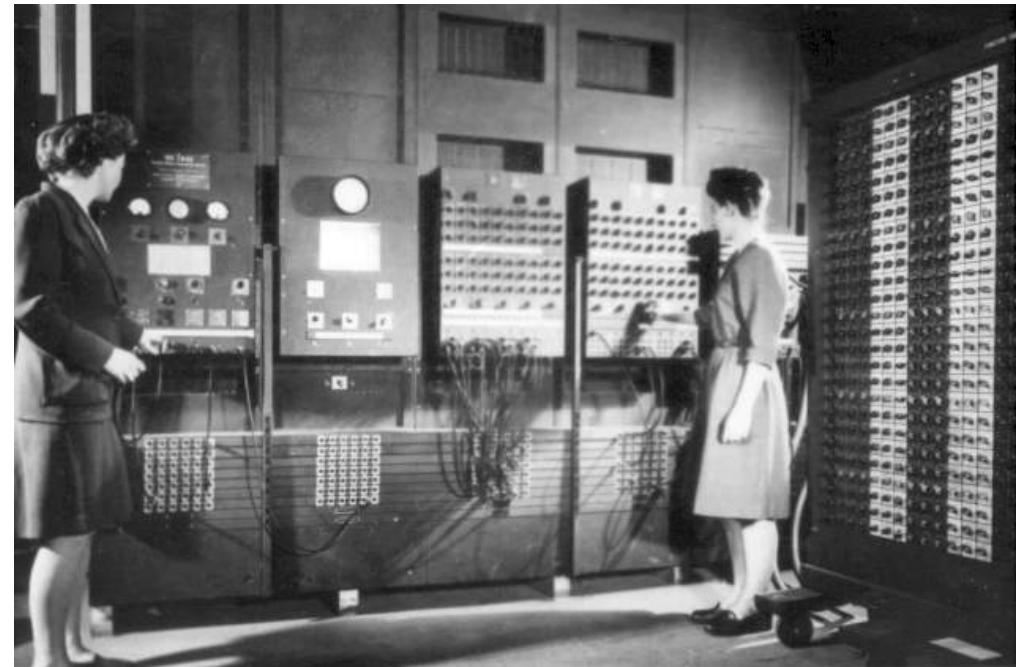
**1922 г.** – первый численный прогноз погоды (Ричардсон)



# Использование компьютеров

**1922** - Первый численный прогноз, Ричардсон считал 6 недель прогноз давления на 6 часов. И прогноз оказался неправильным!

**1950** – первый успешный прогноз погоды на компьютере (ENIAC).



На сегодняшний день лишь 10 центров в мире обладают независимой собственной технологией глобального среднесрочного прогноза (еще 4-5 используют английскую и американскую системы).

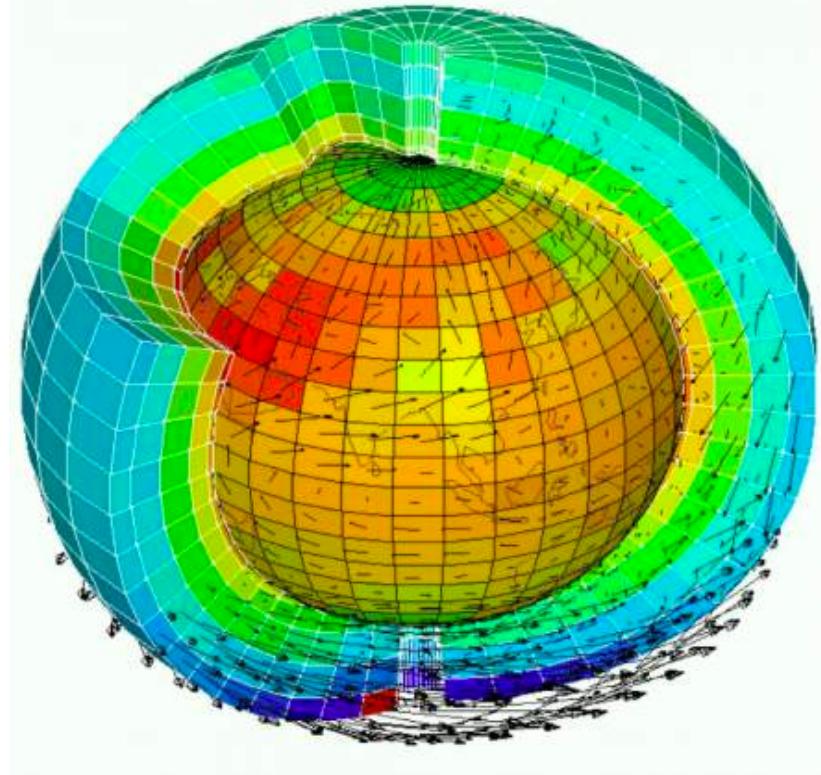
# Численные модели погоды

Основа численных моделей погоды:  
уравнения гидродинамики  
(уравнение Навье-Стокса: одно из  
нерешенных в аналитическом виде  
великих математических  
уравнений).

Уравнения решаются численно (с  
использованием конечно-  
разностных схем).

Многие процессы параметризуются  
(обмен с поверхностью,  
радиационные потоки, образование  
облаков и осадков, химические  
процессы).

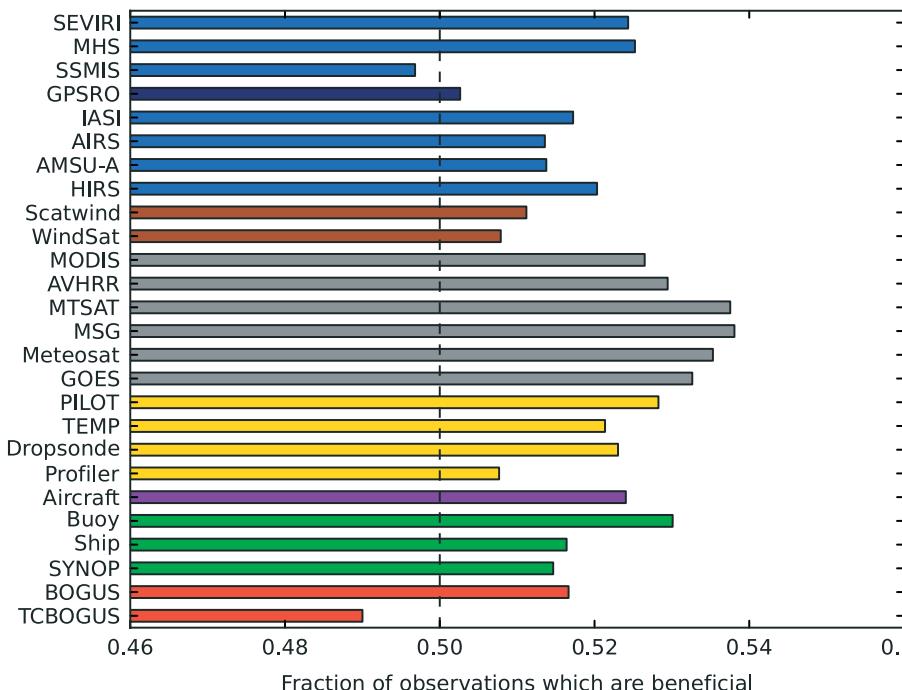
+ система усвоения начальных данных (данных наблюдений).



Решение – на  
трехмерной сетке.

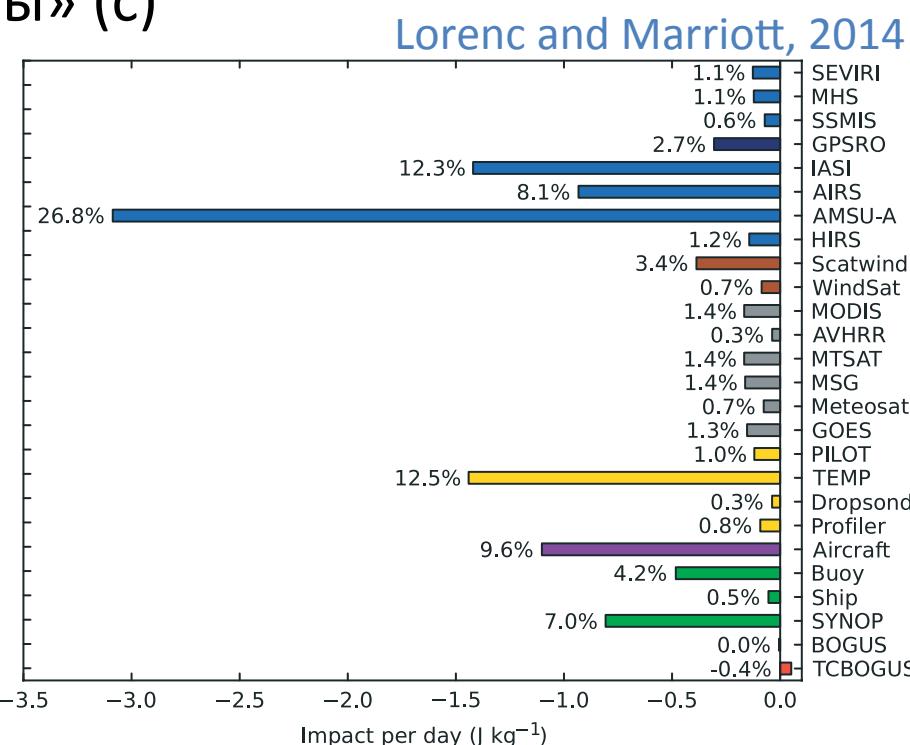
# Усвоение данных наблюдений

## «Не все йогурты одинаково полезны» (с)



Количество полезной для прогноза информации (в среднем: 51,5%)

+ Разные схемы усвоения данных (3D-Var, 4D-Var, Kalman Filter, и др.)



Вклад разных данных в уменьшение ошибки прогноза.

# Усвоение данных наблюдений: объем данных

Пример Гидрометцентра России

Сырые данные: около 20 млн. чисел в день

После отбора, контроля качества, прореживания и агрегирования на вход схемы анализа поступают в день:

- Приземные наблюдения (SYNOP, SHIP, BUOY): 140 тыс.
- Аэрологические наблюдения (TEMP): 60 тыс.
- Самолётные наблюдения о температуре и ветре (AIREP, AMDAR): 800 тыс.
- Скаттерометрические наблюдения о приводном ветре (ASCAT): 15 тыс.
- Радиозатменные наблюдения (профили показателя преломления воздуха, COSMIC, GRAS): 90 тыс.
- Радиационные наблюдения AMSU-A (чувствительные, преимущественно, к температуре в толстых слоях атмосферы) – 180 тыс.
- Радиационные наблюдения MHS (чувствительные к влажности) – 80 тыс.

**Big Data!**

# Как сейчас делают прогноз погоды?

1. Данные измерений.



2. Численные модели (расчёт состояния атмосферы в каждой точке планеты на суперкомпьютерах).



3. Составление подробных карт погоды.



4. Анализ синоптиков  
(карты + опыт работы  
в конкретной локации).



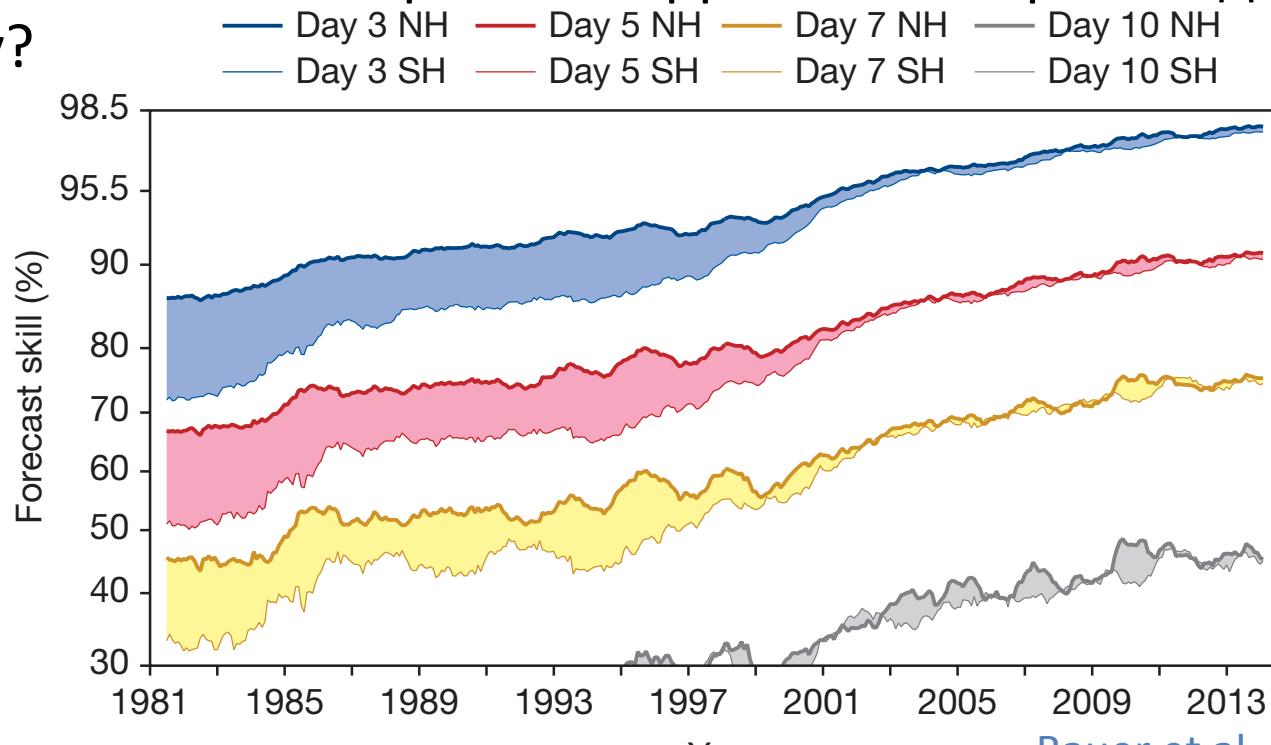
5. Прогноз погоды.



# Качество прогноза погоды

Качество прогноза: насколько прогноз корректно воспроизводит реальную погоду?

Высота  
поверхности  
500 гПа



Оправдываемость прогноза

на 1 день: 97% случаев, на 3 дня: около 92%

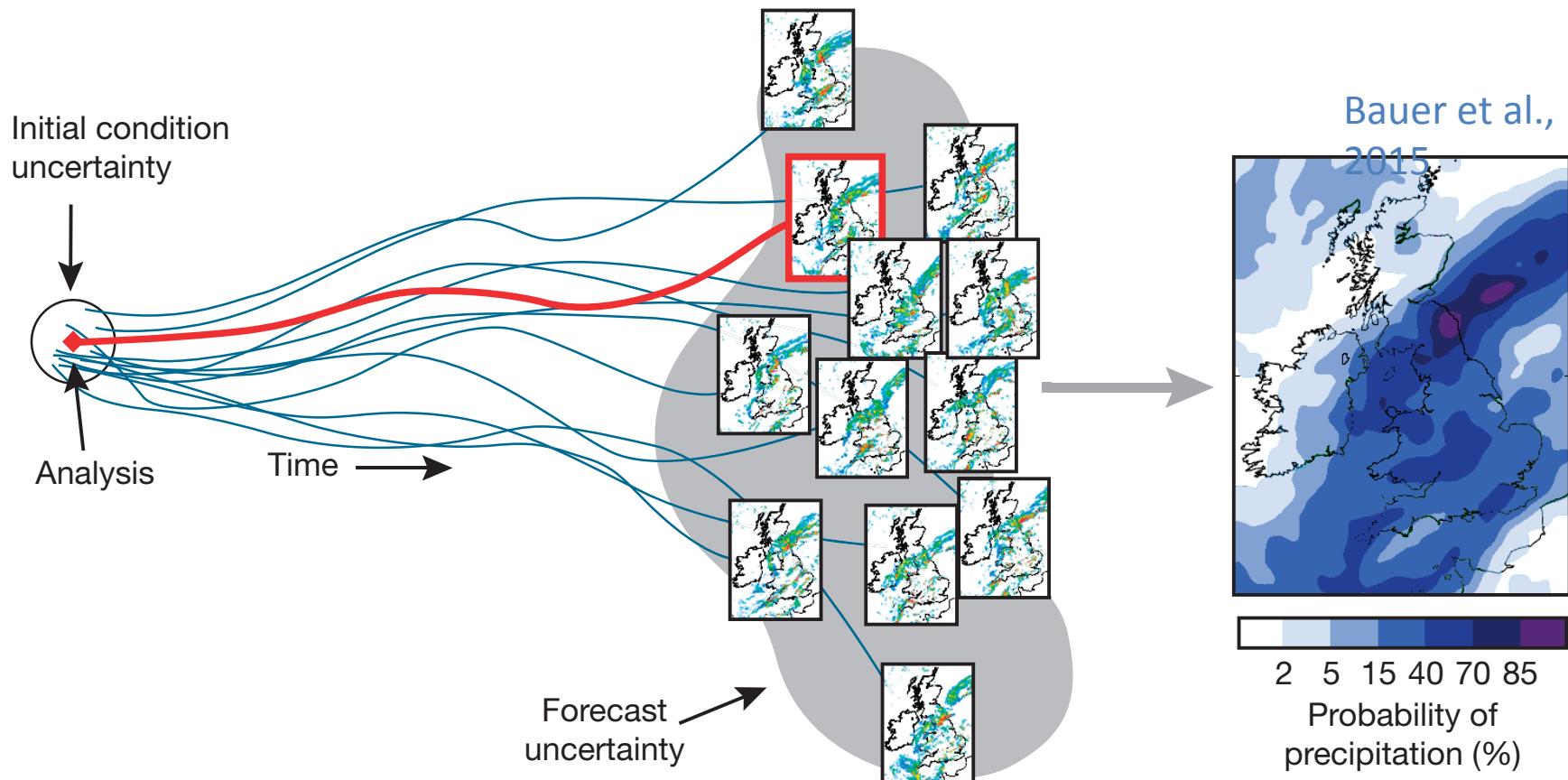
Прогнозам больше чем на 10-14 дней верить нельзя!

(Предел предсказуемости, связан с ошибками в начальных данных).

Bauer et al.,  
2015

# Ансамблевый подход

Для уменьшения влияния погрешности в начальных данных и оценки вероятности каких-либо событий (например, дождя) используется ансамблевый подход (несколько запусков одной модели со слегка разными начальными данными).



# Заблаговременность. Как читать прогноз?

В зависимости от **заблаговременности** прогнозы бывают:

- Сверхкраткосрочные (первые часы)
- Краткосрочные (1-3 суток), Среднесрочные (до 10 суток)
- Долгосрочные, сезонные, прогноз климата

## Как читать прогноз дождей:

**По территории**

Локальные дожди: до 5% территории

Местами дожди: до 30% территории

**По продолжительности**

Кратковременные дожди: до 3 часов

Временами дожди: 3-6 часов

**По интенсивности**

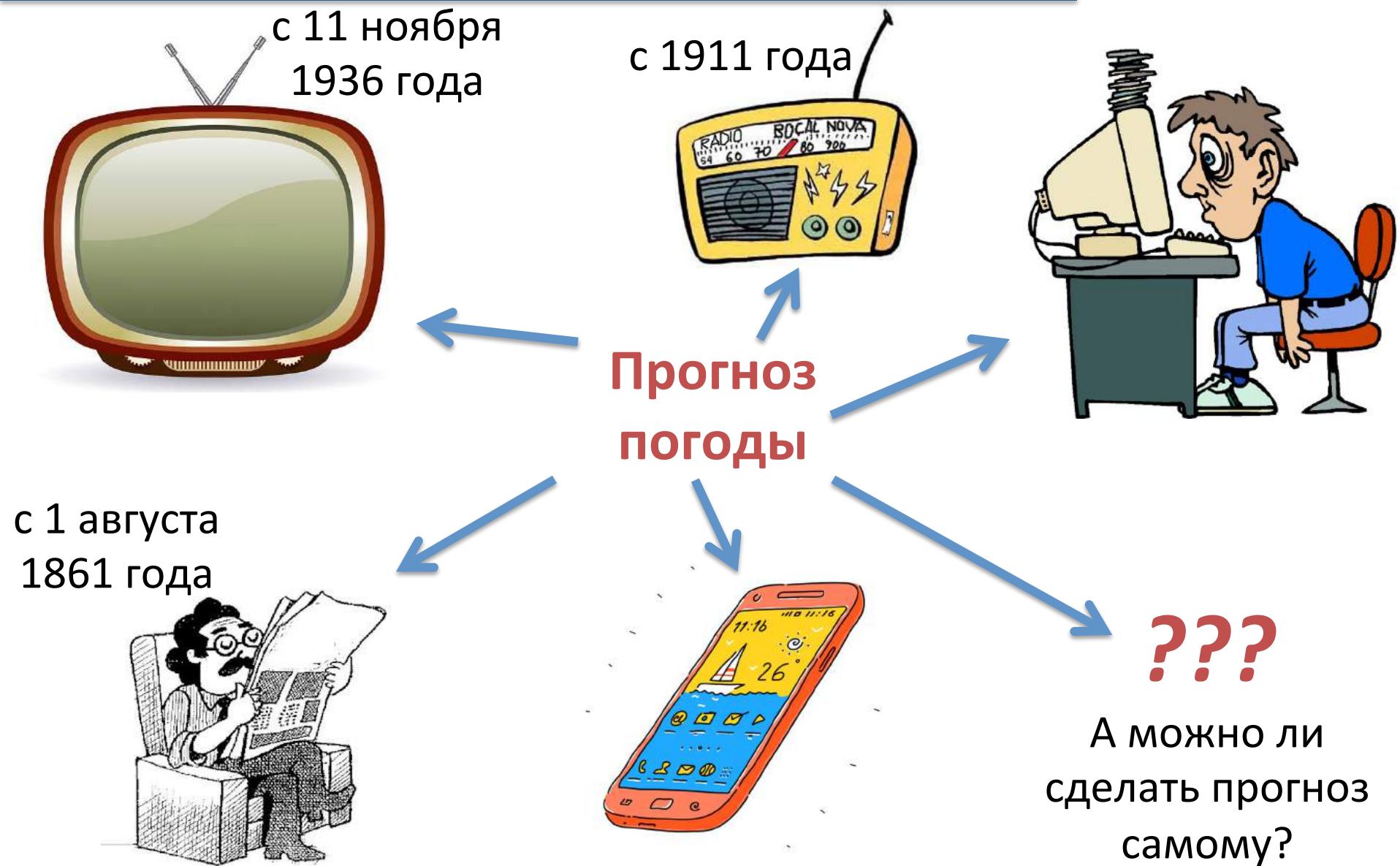
Слабый дождь (<2мм)

Дождь (2-15 мм)

Сильный дождь (15-50 мм)

Очень сильный дождь (>50 мм)

# Где можно узнать прогноз погоды?



- 
- Что такое погода?
  - Как наблюдают за погодой?
  - Как делают прогнозы погоды?
  - **Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?**
  - Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?
  - Можно ли спрогнозировать погоду самому?

# Что такое климат?

*Узкая трактовка:*

Климат – статистический режим атмосферных условий (условий погоды), характерный для каждого данного места Земли в силу его географического положения. То есть: климат – средняя погода данного места.

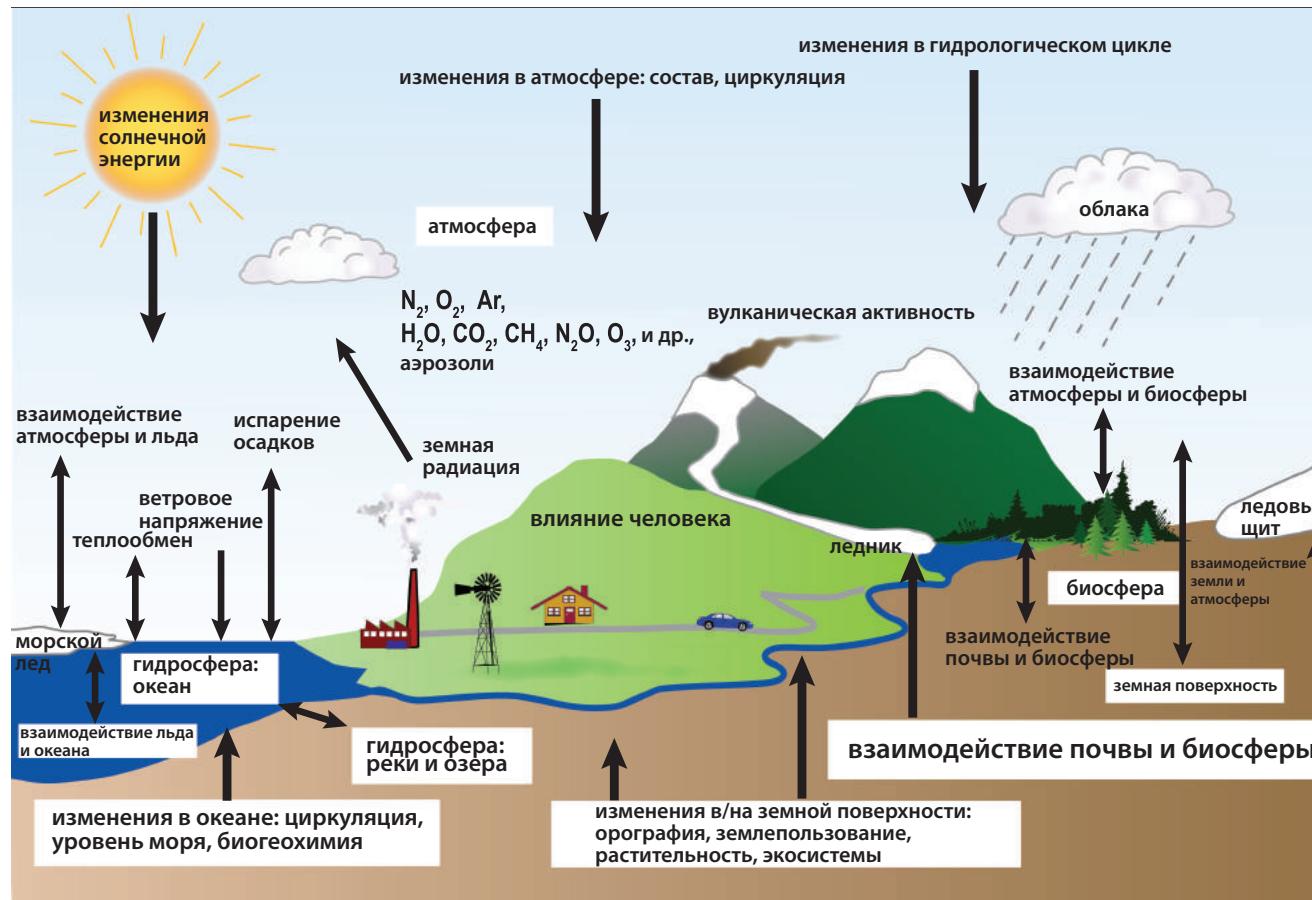


*Более широкая трактовка:*

Климат – статистический режим колебаний состояния атмосферы с короткими периодами (до года), испытывающий колебания с длинными периодами (порядка десятилетий, столетий, тысячелетий). В более широком смысле правильно также говорить не только об атмосфере, но о климатической системе Земли в целом.

# Климатическая система Земли (ЗКС)

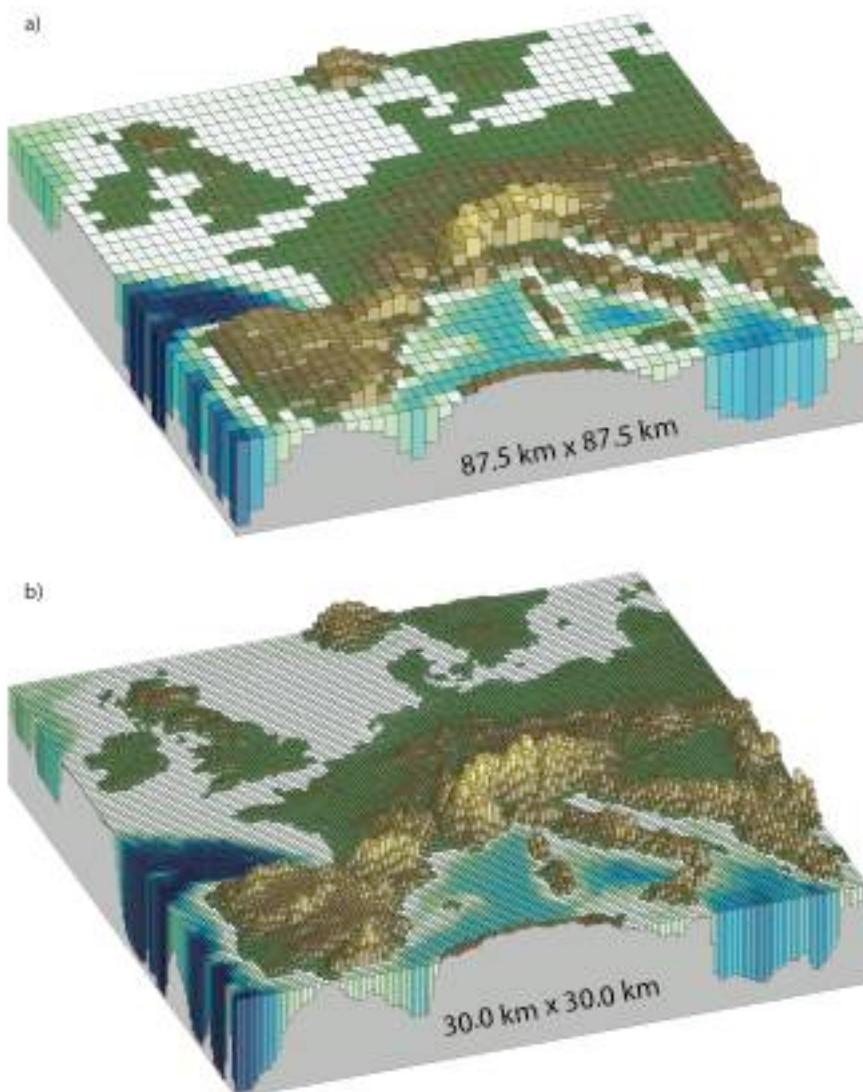
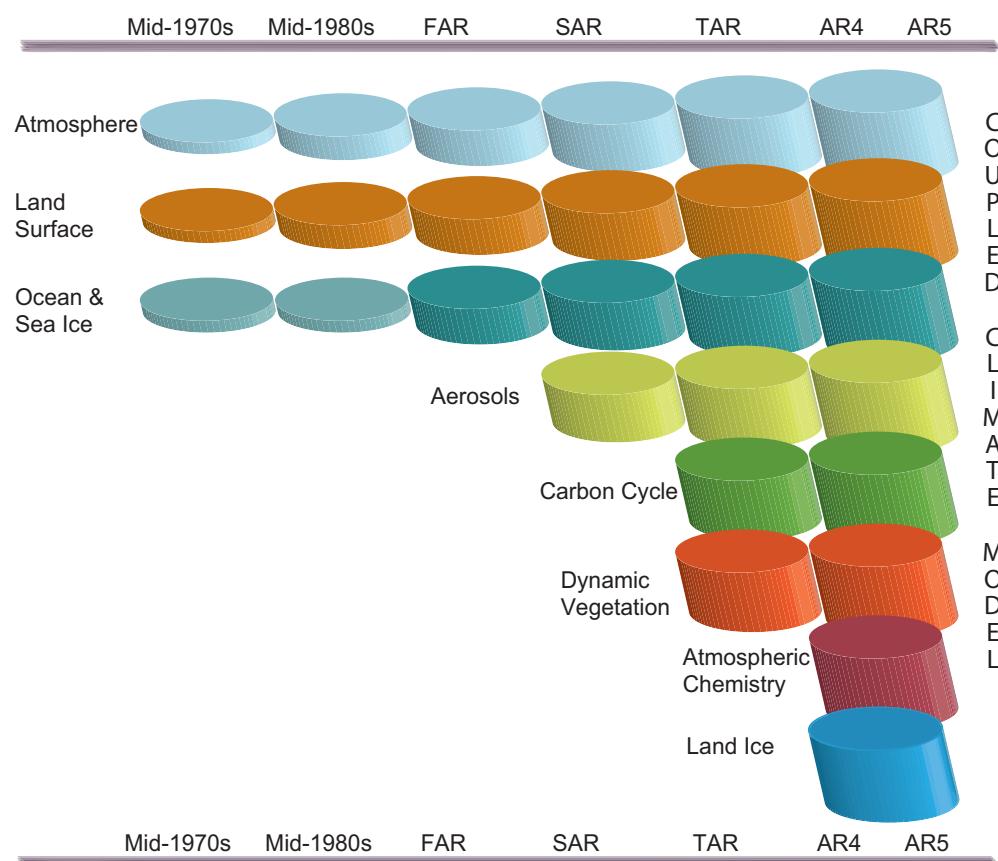
Климатическая система Земли – внутренняя система, состоящую из элементов, взаимодействие которых определяет главные особенности климатического режима. Это - атмосфера-океан-суша-криосфера, и биота.



Внутренняя система – под контролем внешних факторов.

Внешний фактор: нет обратного влияния со стороны системы (нет обратной связи).

# Численные модели климата



Блоки климатических моделей

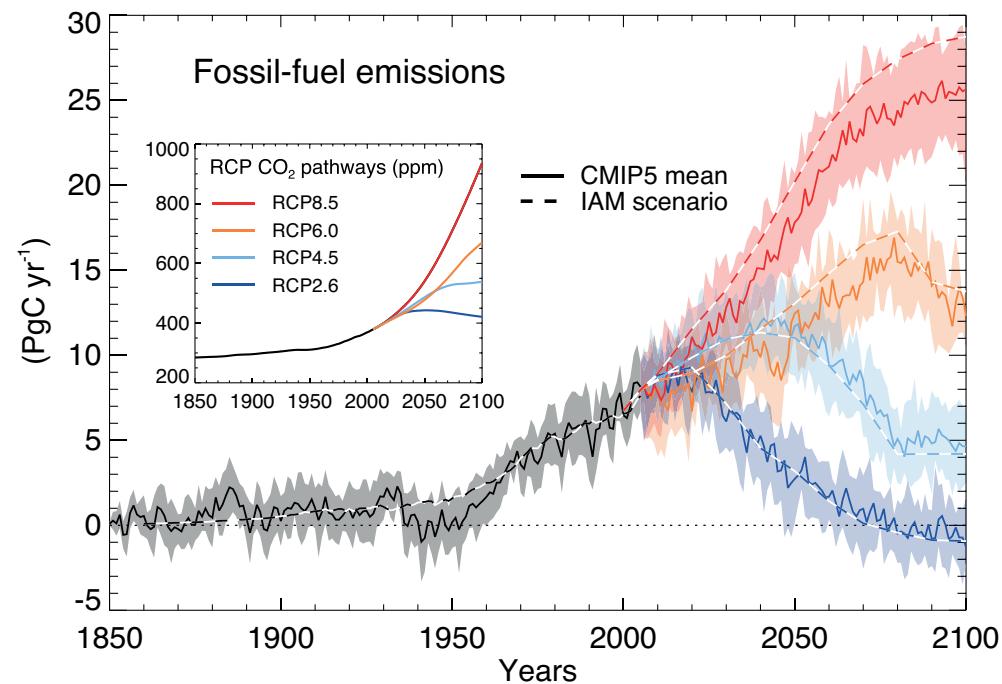
Разрешение климатических моделей

# Климатический прогноз

Моделирование погоды – заданы и граничные и начальные условия, (прогноз 1-го рода).

Климатическое моделирование – моделирование с заданными граничными условиями (прогноз 2-го рода). Климатическое прогнозирование – проекции, расчет вероятности того или иного события.

Проекция климата на 21 век: сценарии эмиссий парниковых газов в атмосфере (рассчитаны экономистами), 11-летний цикл солнечной активности.  
Не заложена информация о вулканах.

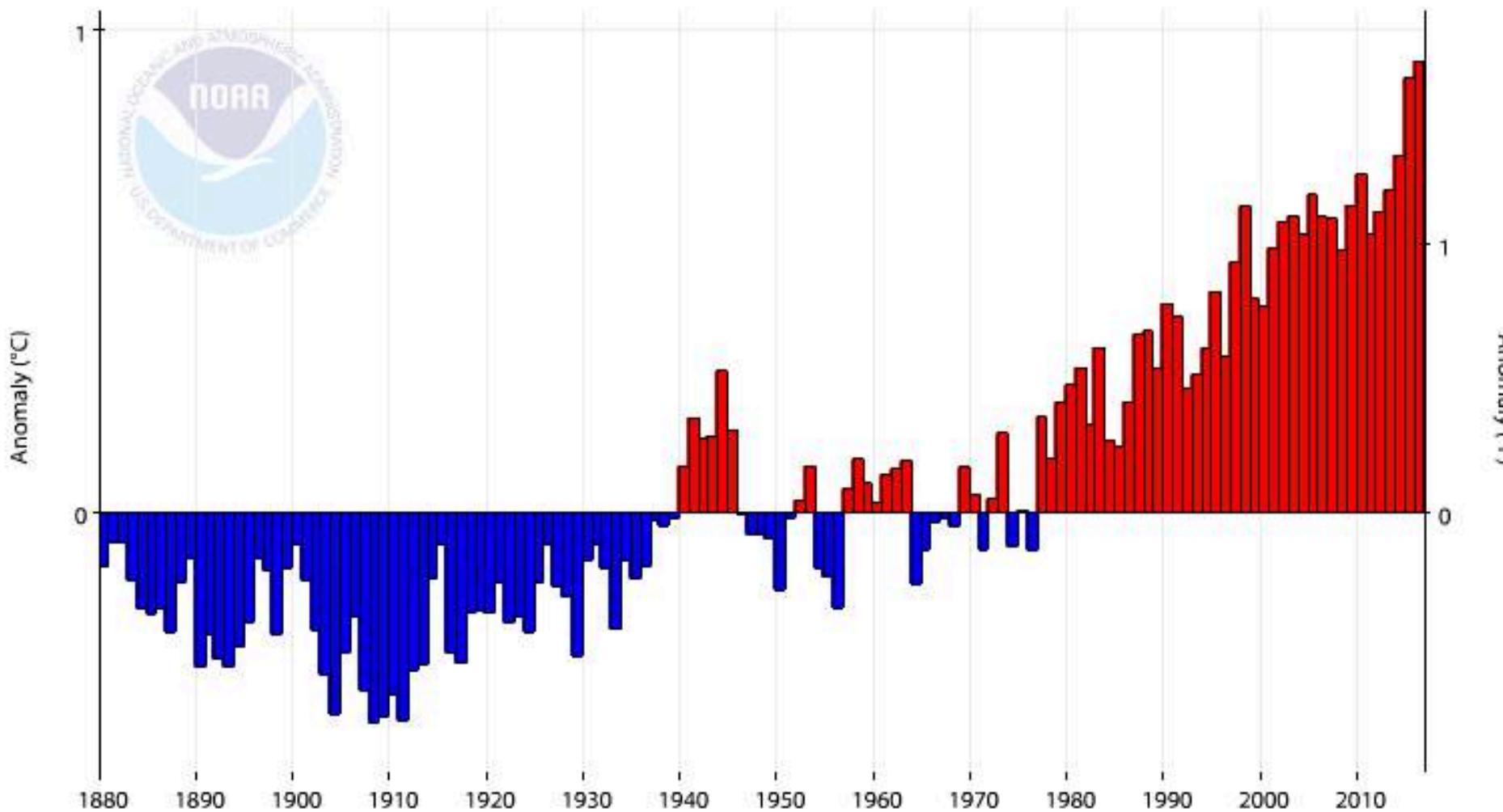


Эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу: наблюдения и сценарии на 21 век

- 
- Что такое погода?
  - Как наблюдают за погодой?
  - Как делают прогнозы погоды?
  - Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?
  - **Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?**
  - Можно ли спрогнозировать погоду самому?

# Современное потепление (I)

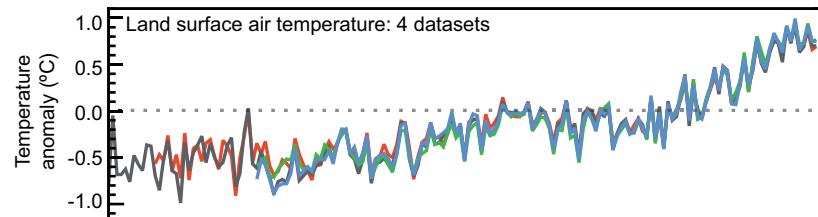
Global Land and Ocean Temperature Anomalies, January-December



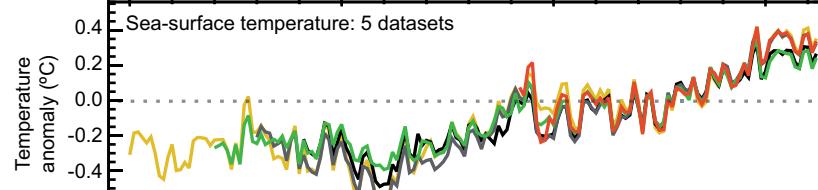
Аномалии глобальной приземной температуры воздуха

# Современное потепление (II)

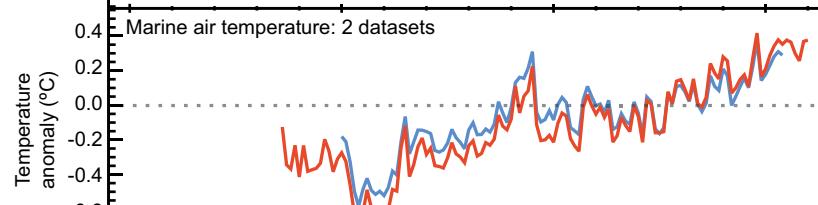
Температура воздуха над сушей



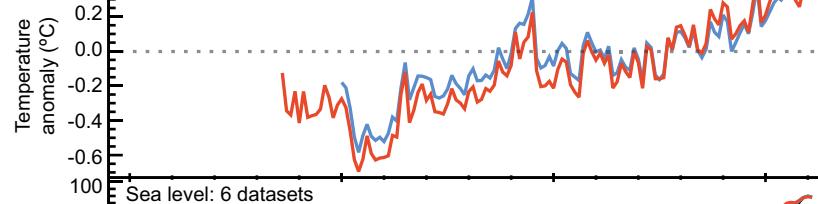
Температура поверхности океана



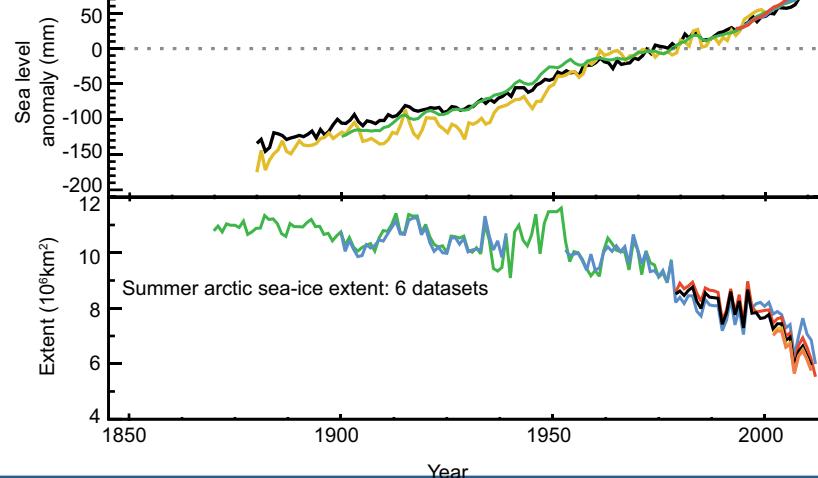
Температура воздуха над океаном



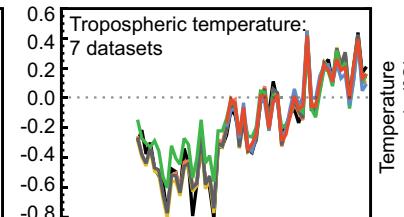
Уровень океана



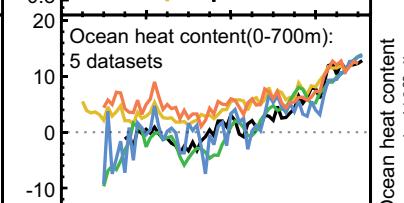
Площадь морского льда в Арктике



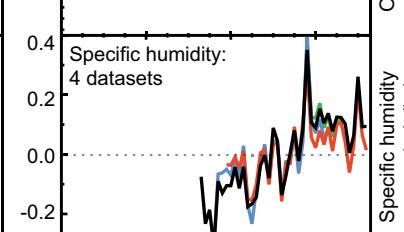
Температура тропосферы



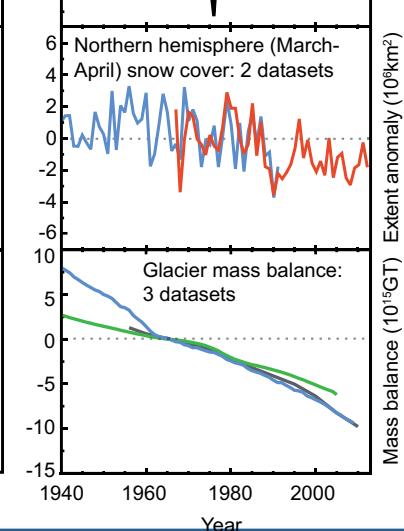
Накопление тепла в океане



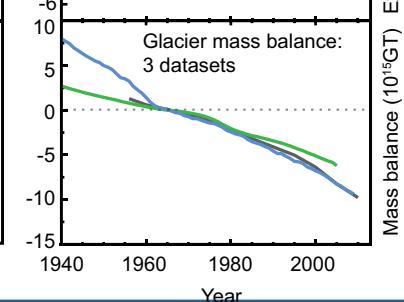
Влажность воздуха



Площадь снега в Северном полушарии



Масса ледников

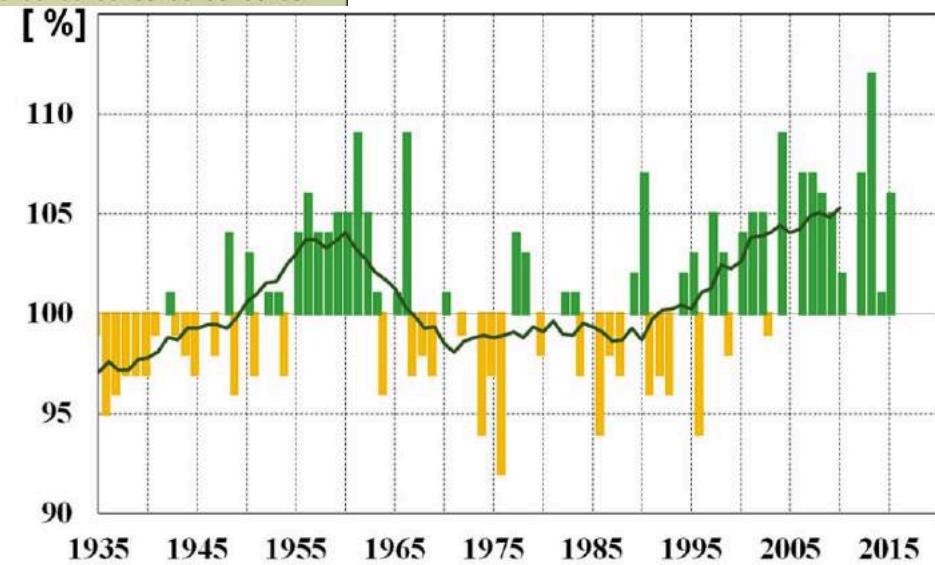


# Изменение температуры и осадков в России



Температура  
воздуха в России  
(по станционным  
наблюдениям)

Осадки в целом  
по России  
(по станционным  
наблюдениям)



ВНИИГМИ-МЦД, 2016

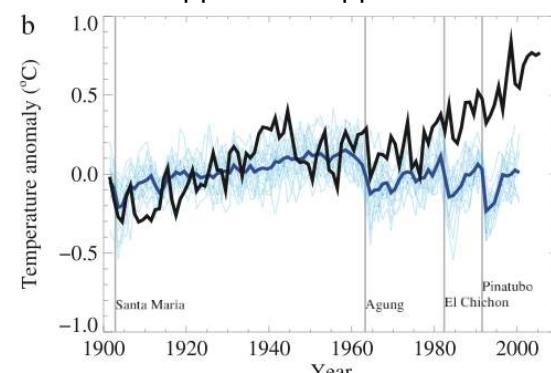
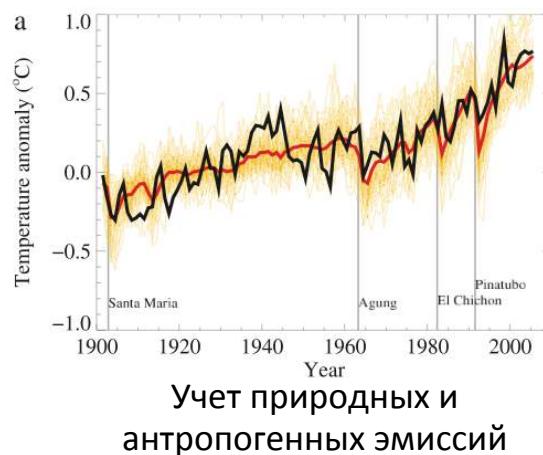
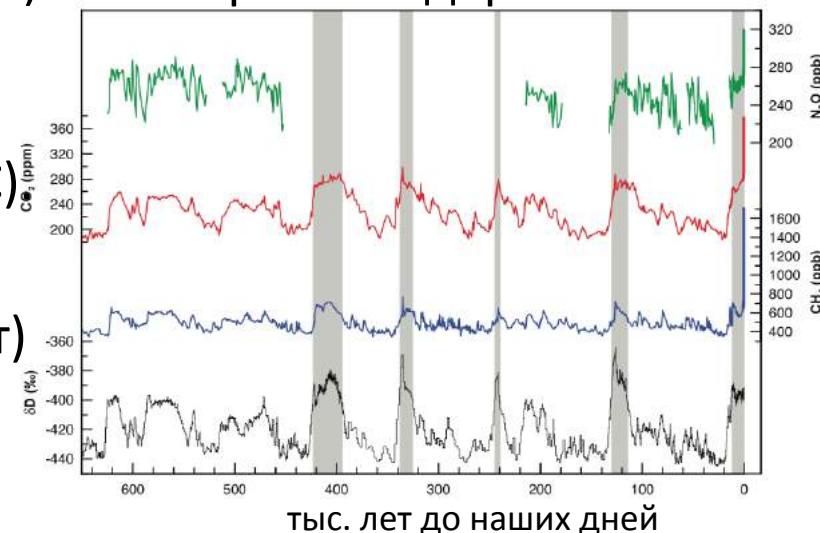
# Виноват ли человек?

1. Эффект Зюсса: сокращение концентрации изотопа углерода  $^{14}\text{C}$  (который образуется в верхних слоях атмосферы и не зависит от естественной климатической изменчивости) за счет роста содержания изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , который попадает в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива (оно не содержит  $^{14}\text{C}$ )

2. Беспрецедентный рост содержания парниковых газов (за последний 1 млн. лет)

3. Невозможность климатических моделей воспроизвести современные изменения климата без учета антропогенных эмиссий парниковых газов.

4. Резкое похолодание в мезосфере.



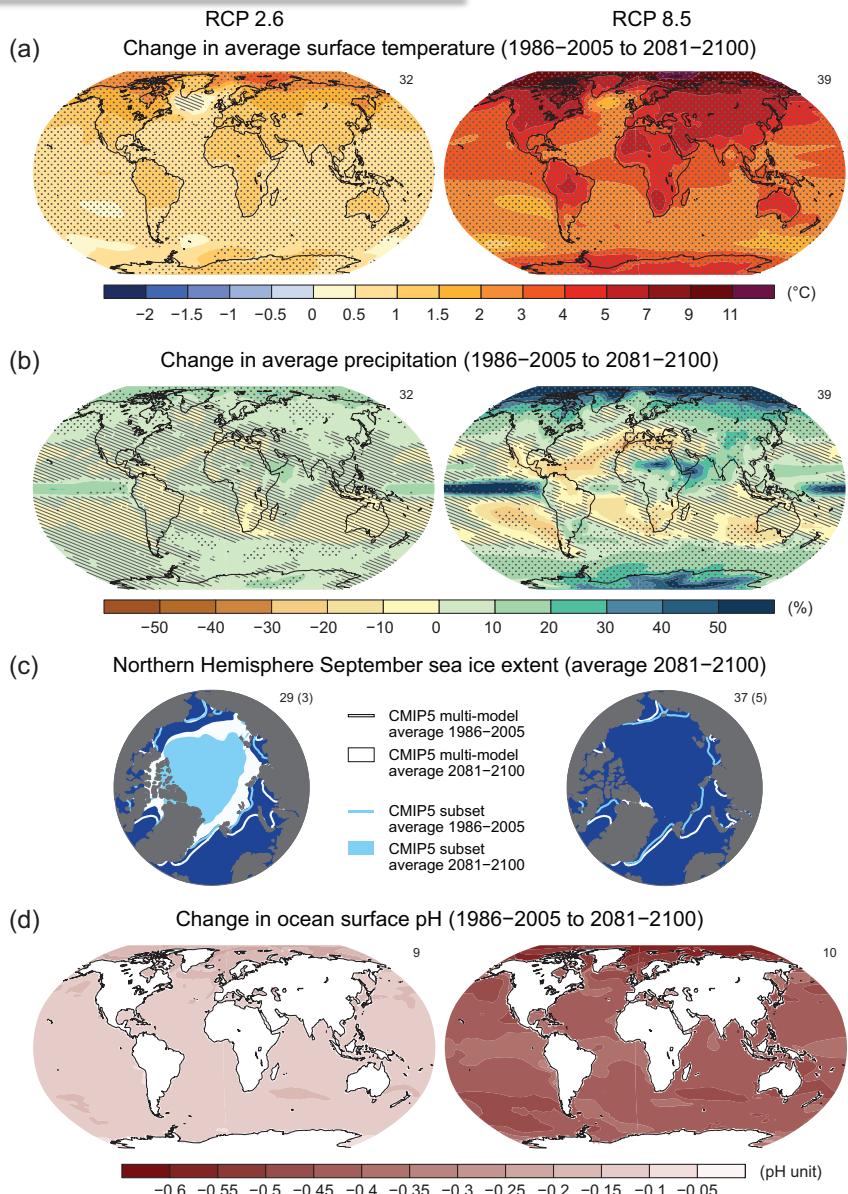
# Климат 21 века

Изменения приземной  
температуры воздуха при  
различных сценариях (конец 21  
в. относительно 1986-2005 гг.)

Изменения количества осадков  
при различных сценариях

Изменение площади льда в  
Арктике

Изменение рН океана  
(рост кислотности океана)



# Погодные катастрофы в России

---

- Рост интенсивности конвективных процессов: больше сильных ливней, рост грозовой активности (больше молний – рост риска возникновения лесных пожаров), рост числа воздушных смерчей.
- Сокращение снегонакопления зимой, рост температуры воздуха летом и перераспределение осадков (ливни станут реже, но сильнее), → рост риска пожароопасности.
- Уменьшение температурного перепада экватор-полюс → ослабление западного переноса → рост роли меридиональных процессов, в том числе интенсивности блокирующих антициклонов (формирование аномально жарких и сухих периодов (ЕТР, лето 2010) или аномально холодных (Урал, 2014)).
- Интенсификация муссонной активности на Дальнем Востоке → риск повторения на Амуре наводнения 2013 года.
- Рост температуры поверхности Черного моря → рост риска сильных ливней в Краснодарском крае (Крымск, 2012; Сочи, 2015).

**Погода становится более нервой!** ак. А.М. Обухов

- 
- Что такое погода?
  - Как наблюдают за погодой?
  - Как делают прогнозы погоды?
  - Что такое климат? Чем отличается прогноз климата от прогноза погоды?
  - Какой климат ждет нас в ближайшие десятилетия?
  - **Можно ли спрогнозировать погоду  
самому?**

# Как прогнозировать погоду самому?

## Как далеко находится гроза?



Засечь разность между молнией и громом:  
1 секунда – это около 330 метров,  
**3 секунды – километр!**

# Как прогнозировать погоду самому?

## О чём говорит цвет неба?



Синий цвет неба: воздух чистый, пришел из Арктики.

**холодно**



Небо бледное, «беловатое»: в воздухе много пыли, песка. Воздух пришел с юга (например, из Африки).

**жарко**

Небо красноватое: в воздухе много морского аэрозоля, воздух пришел из Атлантики.

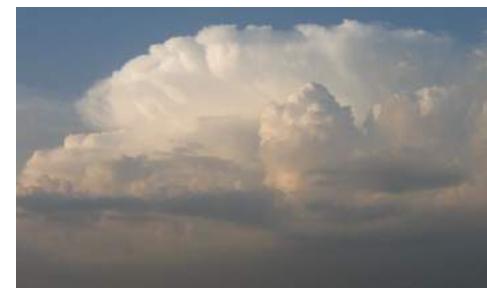
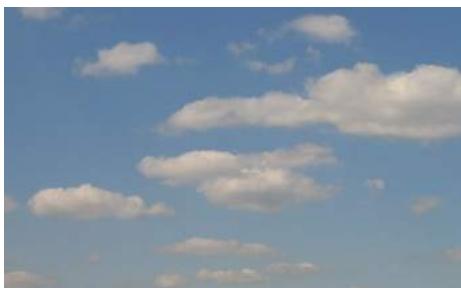
**влажно**

Красный закат предвещает изменение погоды!

# Как прогнозировать погоду самому?

## О чём говорят облака?

1. Развитие кучевых облаков летом:  
может скоро (в течение 2-3 часов) пойти ливень!



2. Гало (круг света вокруг Луны  
или Солнца) зимой:  
скоро начнется снег (через 6-8 часов),  
придет потепление.



3. И многое-многое другое!

# Как прогнозировать погоду самому?

Смотрим за давлением!



Падение давления предвещает ухудшение погоды  
(например: приближение теплого фронта).

# Прогноз погоды и климата: возможное будущее

## 1. Рост качества прогноза (заблаговременности и точности):

- Данные: улучшение точности данных наблюдений, привлечение новых контактных данных (например, домашних и частных метеостанций), разработка новых данных дистанционного зондирования.
- Модели: улучшение вертикального и горизонтального разрешения моделей (это позволяют делать растущие счетные мощности), моделирование физических процессов (вместо их параметризации), улучшение системы усвоения данных, усвоение новых типов данных, «бесшовный» прогноз.
- Решение уравнения Навье-Стокса.
- Преодоление предела предсказуемости.

## 2. Улучшение качества подачи информации:

- Доступ к сверхкраткосрочным прогнозам, штормовые предупреждения.
- Рост доверия к прогнозам (подорвано из-за огромного числа сырых прогнозов в Интернете и невнятной политики Росгидромета).
- Прогноз в понятных терминах, целевой прогноз.

# Прогноз погоды и климата: возможное будущее

---

**Спасибо за внимание!**

Если вы в лютый мороз видите на улице женщину в летнем платье, знайте, это – жена метеоролога!