

# Физическая экология

## Занятие 12

Предсказуем ли климат?

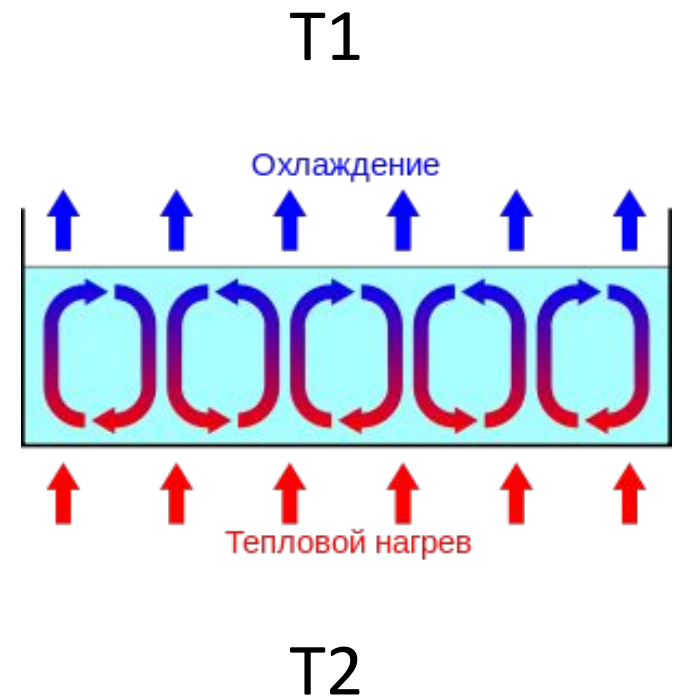
Аттрактор Лоренца

Контроль парниковых газов

# Конвекция Бенара

А. Бенар (1900 г.): Опыты по нагреванию тонкого слоя спермацета, разлитого на нагреваемый снизу горизонтальный стальной лист

1.  $T_2 - T_1 = 0$  – асимптотически устойчивое состояние в отсутствии нагревания
2.  $T_2 - T_1 > 0$ , но  $T_2 - T_1 < T_1$  – перенос тепла теплопроводностью, сохранение однородности среды
3.  $T_1 < T_2 - T_1 < T_2$  – появление упорядоченных структур, нарушение симметрии пространства, установление пространственных корреляций.  
Детерминировано – появление ячеек и их масштаб, случайно – направление движений в данной точке.
4.  $T_2 - T_1 > T_2$  разрушение упорядоченной структуры, переход от конвекции к турбулентности.



# Приближение Обербека

Опыты Бенара привлекли внимание к физическому описанию движения сплошных сред в градиенте температуры. Одной из наиболее популярных моделей для описания конвекции, возникающей в жидкостях и газах, является приближение Обербека для несжимаемой среды. Исходные уравнения приведены ниже.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \cdot \text{div}(c)$$

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + v \cdot \Delta c + g$$

$$\frac{dT}{dt} = \phi \cdot \Delta T$$

Здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\phi$  - температуропроводность.

# Система уравнений Обербека-Буссинеска для конвективной атмосферы

Переход от описания характеристик элемента движущейся среды к описанию характеристик среды в заданной точке пространства формально связан с переходом от полной производной по времени (субстанциальной) к частной производной (локальной).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho \mathbf{c})$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{v} \cdot \Delta c + \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(T \mathbf{c}) + \phi \cdot \Delta T$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \gamma (T - T_0))$$

# Приближенное решение

Решение искалось в виде периодических по горизонтальной координате полей потенциала скорости  $\psi$  и отклонения температуры  $\theta$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta\psi) = \left( \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{\partial\Delta\psi}{\partial y} - \frac{\partial\psi}{\partial y} \frac{\partial\Delta\psi}{\partial x} \right) + \nu\Delta^2\psi + g\alpha \frac{\partial\theta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \left( \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial y} - \frac{\partial\psi}{\partial y} \frac{\partial\theta}{\partial x} \right) - \frac{T_2 - T_1}{h} \frac{\partial\psi}{\partial x} + \phi\Delta^2\theta$$

Система двух уравнений в частных производных четвертого порядка. Здесь  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения,  $h$  - высота слоя.

# Классическая система Лоренца

Лоренц свел задачу к системе трех дифференциальных уравнений для трех переменных по безразмерному времени:

$X(\tau)$  – амплитуды конвективного движения,

$Y(\tau)$  – разности температур восходящего и нисходящего потоков,

$Z(\tau)$  – отклонения вертикального профиля температур от линейного закона.

$$\frac{dX}{d\tau} = -\sigma \cdot X + \sigma \cdot Y;$$

$$\frac{dY}{d\tau} = -X \cdot Z + r \cdot X - Y;$$

$$\frac{dZ}{d\tau} = X \cdot Y - b \cdot Z,$$

$$\tau = \frac{\pi^2}{h^2} (1 + a^2) \phi t$$

$\sigma$  – число Прандтля, равное отношению кинематической вязкости к температуропроводности,

$b = 4(1 + a^2)^{-1}$  – масштаб задачи,  $a$  – аспектное отношение,

$r$  – управляющий параметр, характеризующий контраст температуры.

# Свойства системы Лоренца

Система Лоренца нелинейна и не имеет аналитического решения. Однако некоторые выводы можно сделать и без него. Легко получить, что при  $r < 1$  существует только одно устойчивое состояние системы:  $X = Y = Z = 0$ .

При  $r > 1$  движение становится неустойчивым, и возникают два новых ненулевых решения:  $Z = r - 1$ ,  $X^2 = b \cdot (r - 1)$ ,  $Y = X$ .

При  $r > 24,74$  они также становятся неустойчивыми, и в системе возникают нерегулярные колебания.

Система является диссипативной, поскольку ее фазовый объем сокращается, и сокращение происходит с

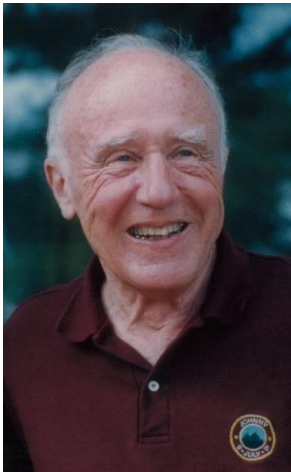
постоянной скоростью:

$$\frac{\partial X'}{\partial X} + \frac{\partial Y'}{\partial Y} + \frac{\partial Z'}{\partial Z} = -(\sigma + b + 1).$$

При этом траектории системы при всех положительных значениях параметров стягиваются в некоторую область фазового пространства.

# Аттрактор Лоренца

Ограниченная область фазового пространства, в которую со временем попадает любая фазовая траектория, называют аттрактором системы.



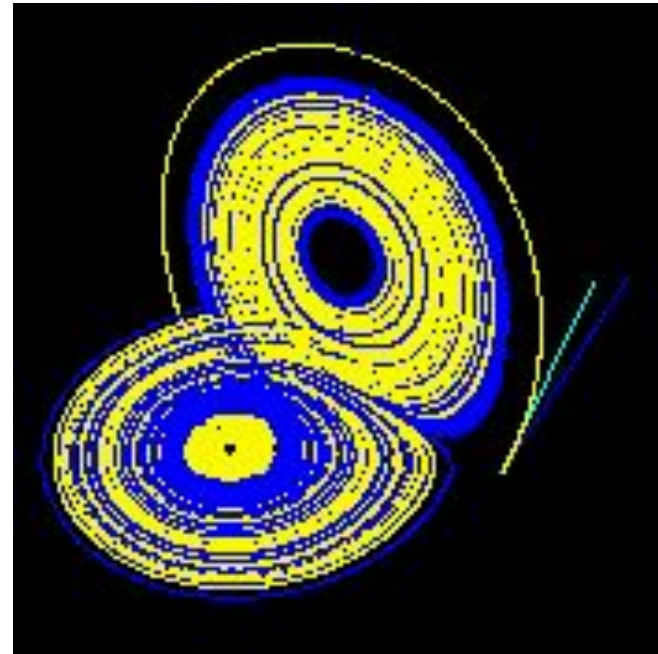
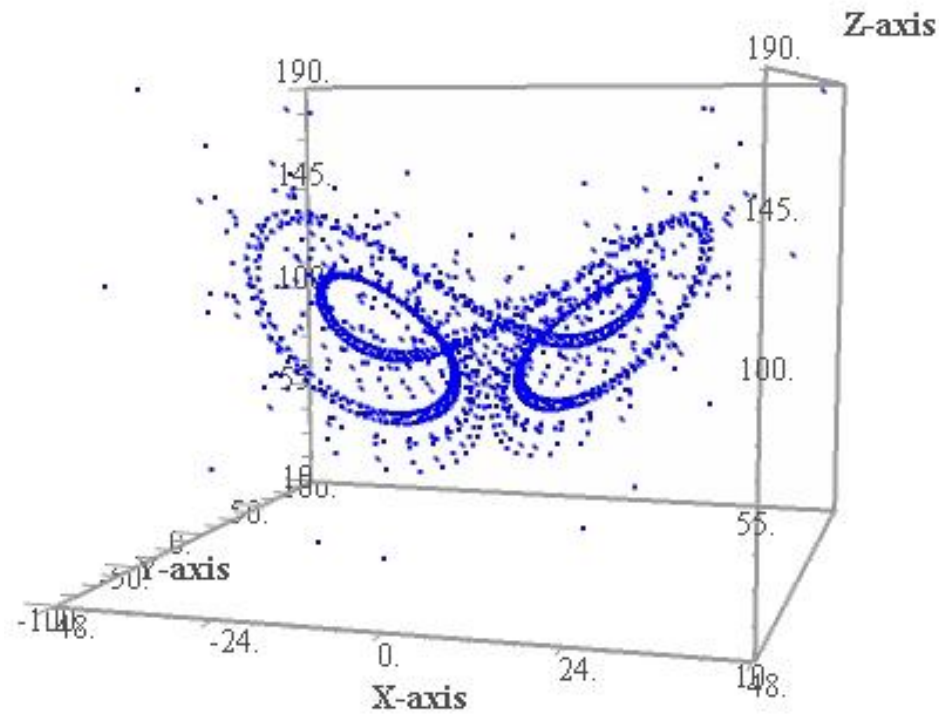
**Эдвард Нортон Лоренц** (*Edward Norton Lorenz*; 1917 — 2008) — американский математик и метеоролог, один из основоположников теории детерминированного хаоса.

Аттрактор Лоренца является первым реальным физическим примером детерминированной динамической системы с хаотическим поведением.

Lorenz E. N., 1963 Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmospheric Science*, v. 20, p. 130-141.



# Аттрактор Лоренца



Критические параметры:

$$\sigma = 10, b = 8/3, r > 24,74$$

# Размерность аттрактора

Размерность — количество независимых переменных, необходимых для описания состояния объекта, или количество степеней свободы системы.

Метрическая размерность (Хаусдорфа) лучше всего согласуется с нашими обычными представлениями. Например, в трёхмерном евклидовом пространстве метрическая размерность конечного множества равна нулю, размерность гладкой кривой — единице, размерность гладкой поверхности — двум и размерность множества ненулевого объёма — трём.

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N_\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)}$$

# Странный аттрактор

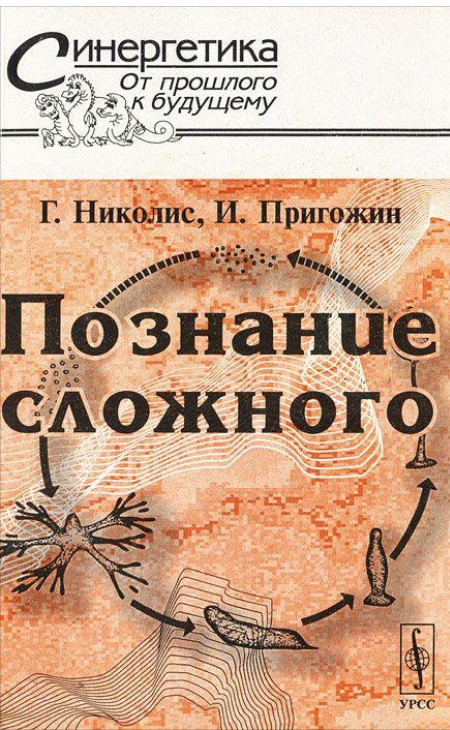
В простейшем случае аттрактором может быть точка, которая является состоянием устойчивого равновесия. Аттрактором может быть замкнутая кривая, называемая предельным циклом. Модель Лоренца показала, что аттрактор может иметь гораздо более сложную структуру. Ее аттрактор оказался большим, чем плоскость, но меньшим, чем объем. Метрическая размерность аттрактора Лоренца равна 2,06. Такие системы договорились называть **странными аттракторами**. Удивительное свойство системы: ее фазовые траектории чрезвычайно чувствительны к начальным условиям. Численный анализ показал, что при достижении управляющим параметром критического значения  $r > r_{\text{крит}} \sim 24,74$  максимально близкие траектории системы экспоненциально расходятся.

# Предсказуема ли погода?

Эффект расходящихся траекторий Лоренц назвал «эффектом бабочки». Возвращаясь к физическому содержанию задачи, он писал, что ничтожные изменения в атмосферной динамике, вносимые, например, колебаниями крыльев бабочки, приводят к потере точности прогноза поведения всей системы. «Предсказать погоду на достаточно отдаленное будущее невозможно никаким методом, если только теперешнее состояние не известно точно. Из-за неизбежной неточности и неполноты наблюдений погоды точное предсказание на очень долгий срок, видимо, невозможно». Это не вычислительная проблема, а фундаментальное свойство динамической системы с детерминированным хаосом. Долгосрочный прогноз невозможен не технически, а принципиально. Вывод, который при сходстве используемых уравнений может быть перенесен на прогноз климата.

# Предсказуем ли климат?

Илья Романович Пригожин (1917 — 2003)  
— бельгийский физик и физико-химик  
российского происхождения. Лауреат  
Нобелевской премии по химии (1977 г.),  
виконт Бельгии.

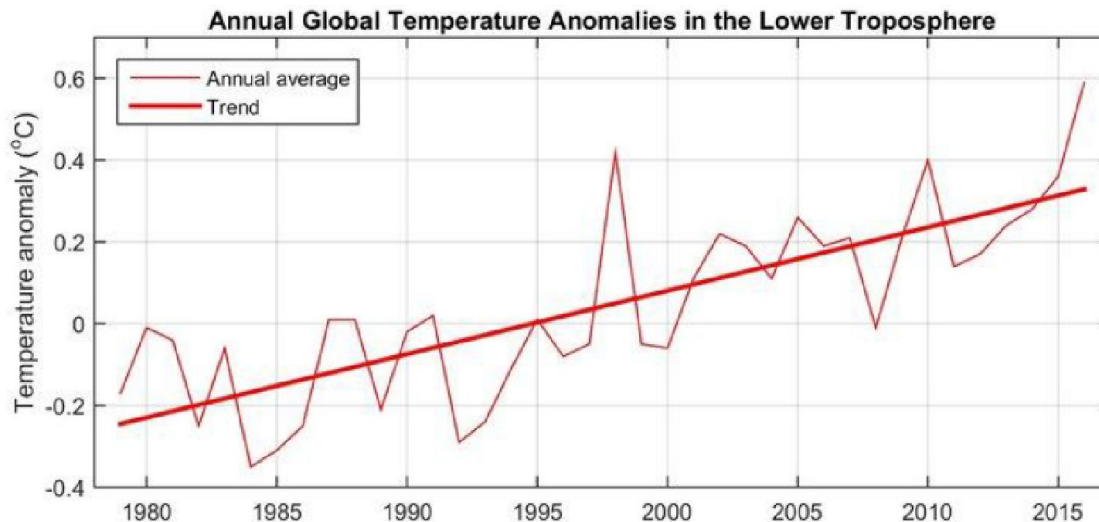
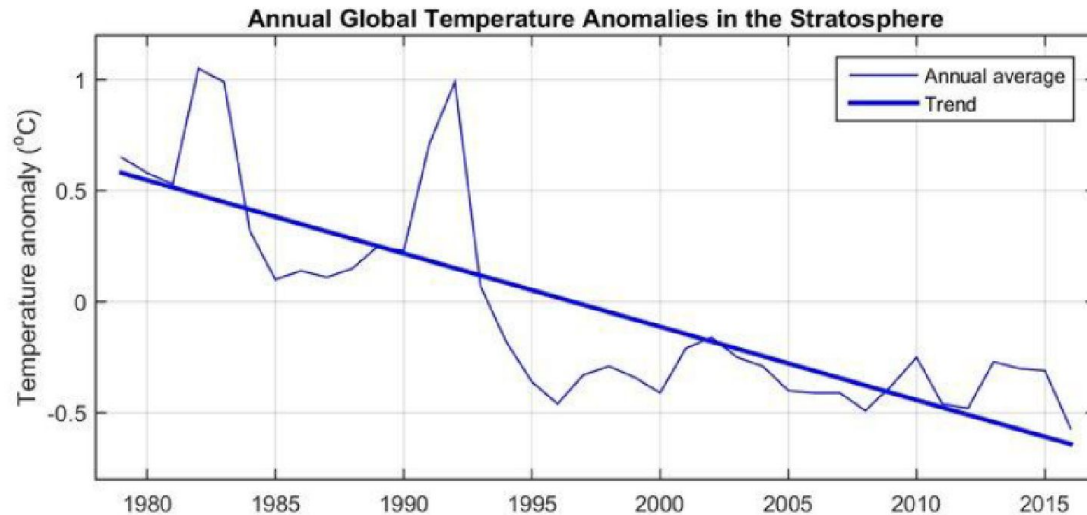


Nicolis, C., and G. Nicolis, 1984: Is there a climatic attractor? *Nature*, 331, 529- 532.  
Grassberger, O., 1986: Do climate attractors exists? *Nature*, 323, 609-612.  
Lorenz, E.N., 1991: Dimension of weater and climate attractors. *Nature*, 353, 241-244.



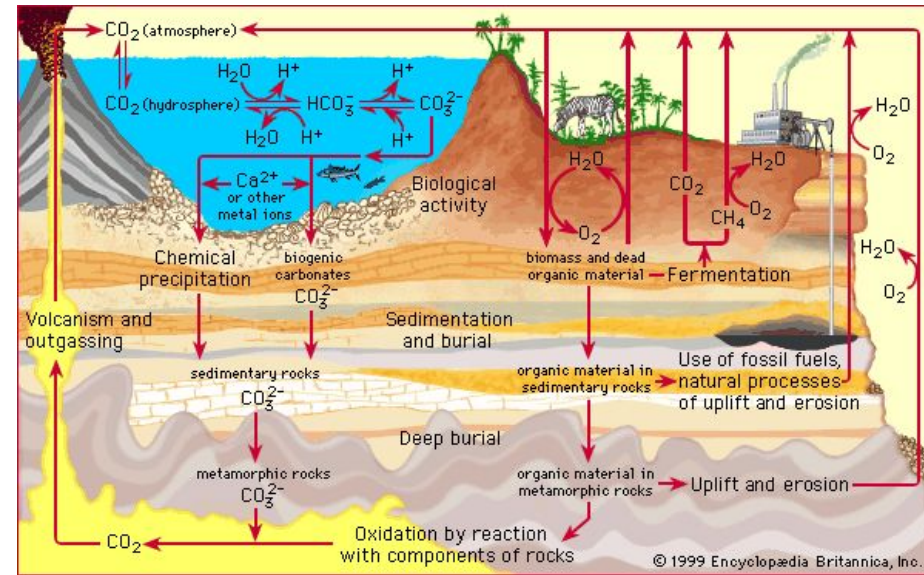
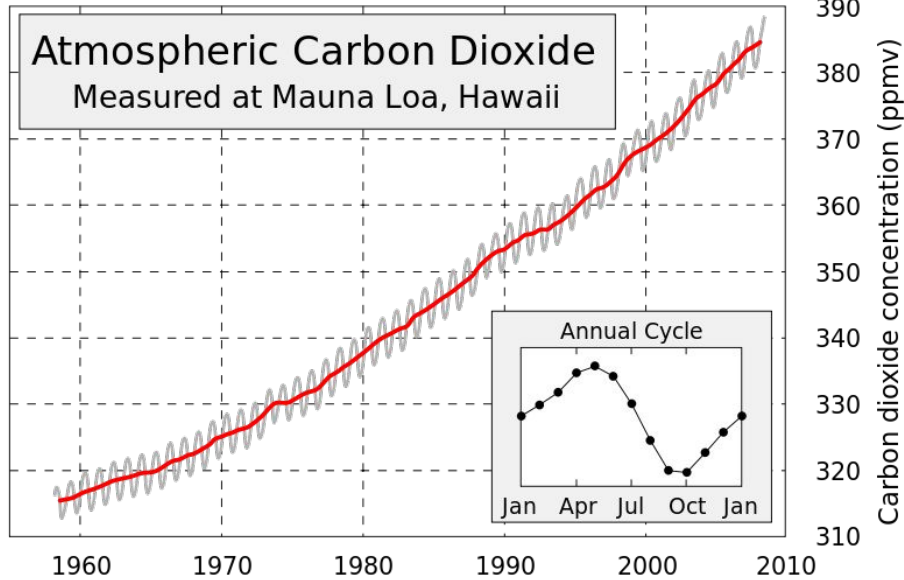
# Доказательство антропогенного изменения климата

Температурное отклонение  
Стратосфера

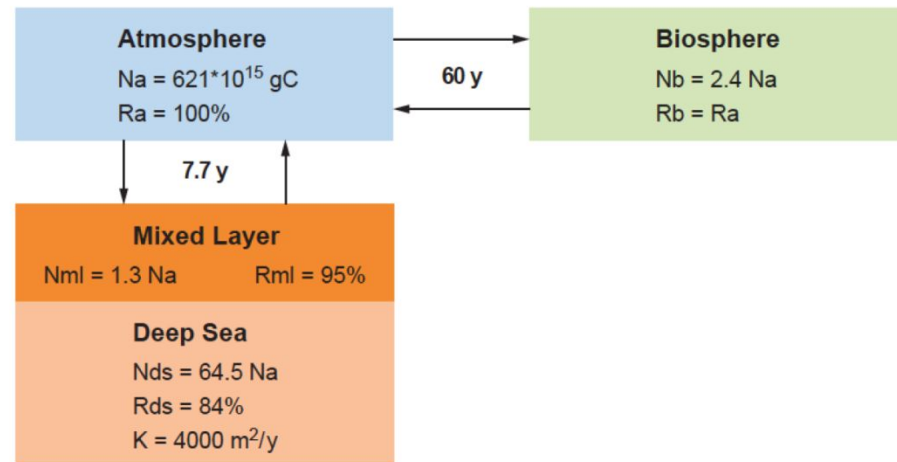


Нижняя  
тропосфера

# Модель антропогенного парникового эффекта

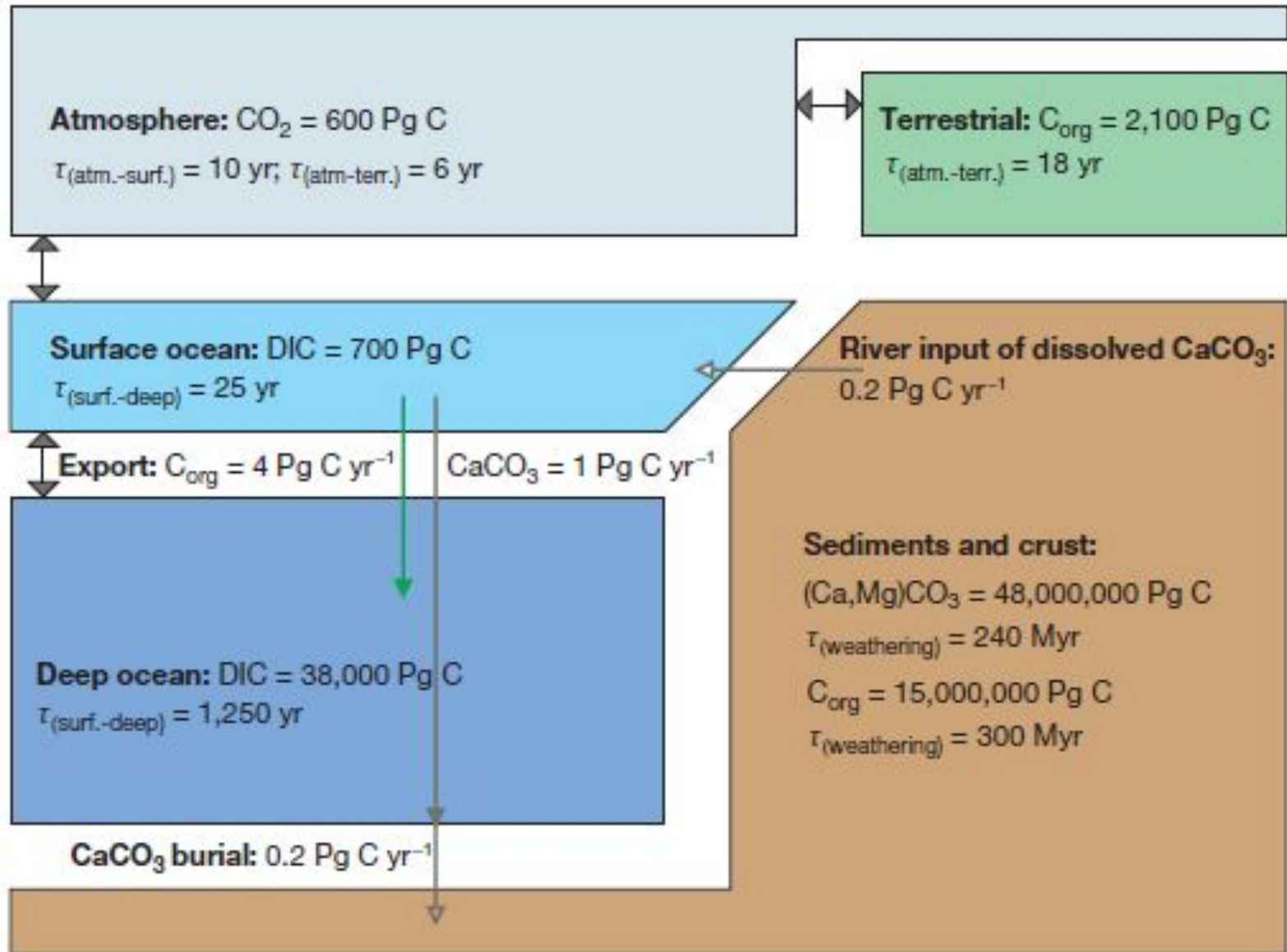


Источник	Поток углерода, Гт·год <sup>-1</sup>	
	1980–1989	2006–2015
От ископаемого топлива в атмосферу	5,4 ± 0,3	9,3 ± 0,4
От вырубки лесов и распашки земли в атмосферу	0,2 ± 0,7	1,0 ± 0,5
Поглощение растительностью	2,1 ± 0,5	3,1 ± 0,8
Уход в океан	1,9 ± 0,6	2,6 ± 0,5





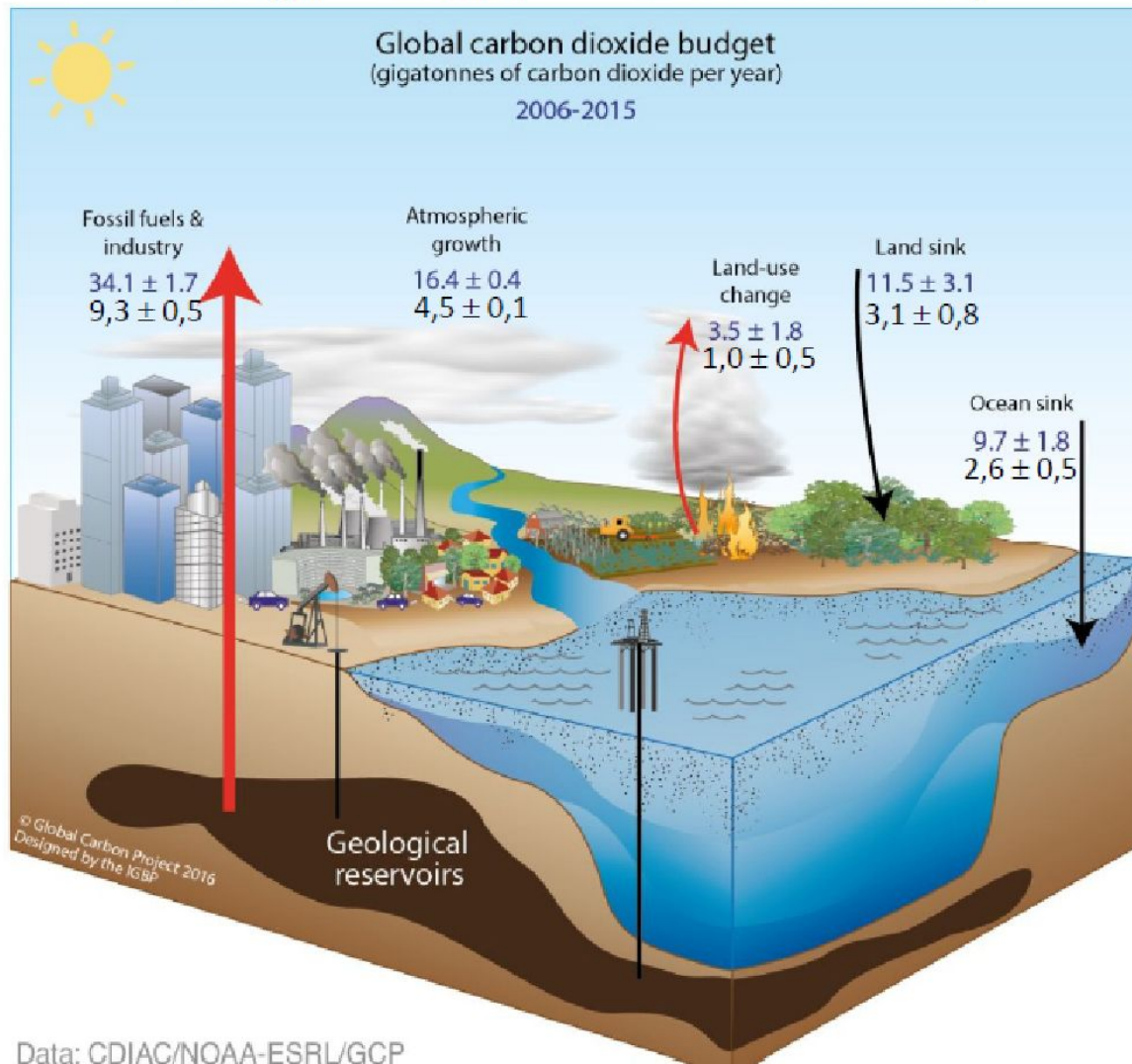
# Углеродообменная система



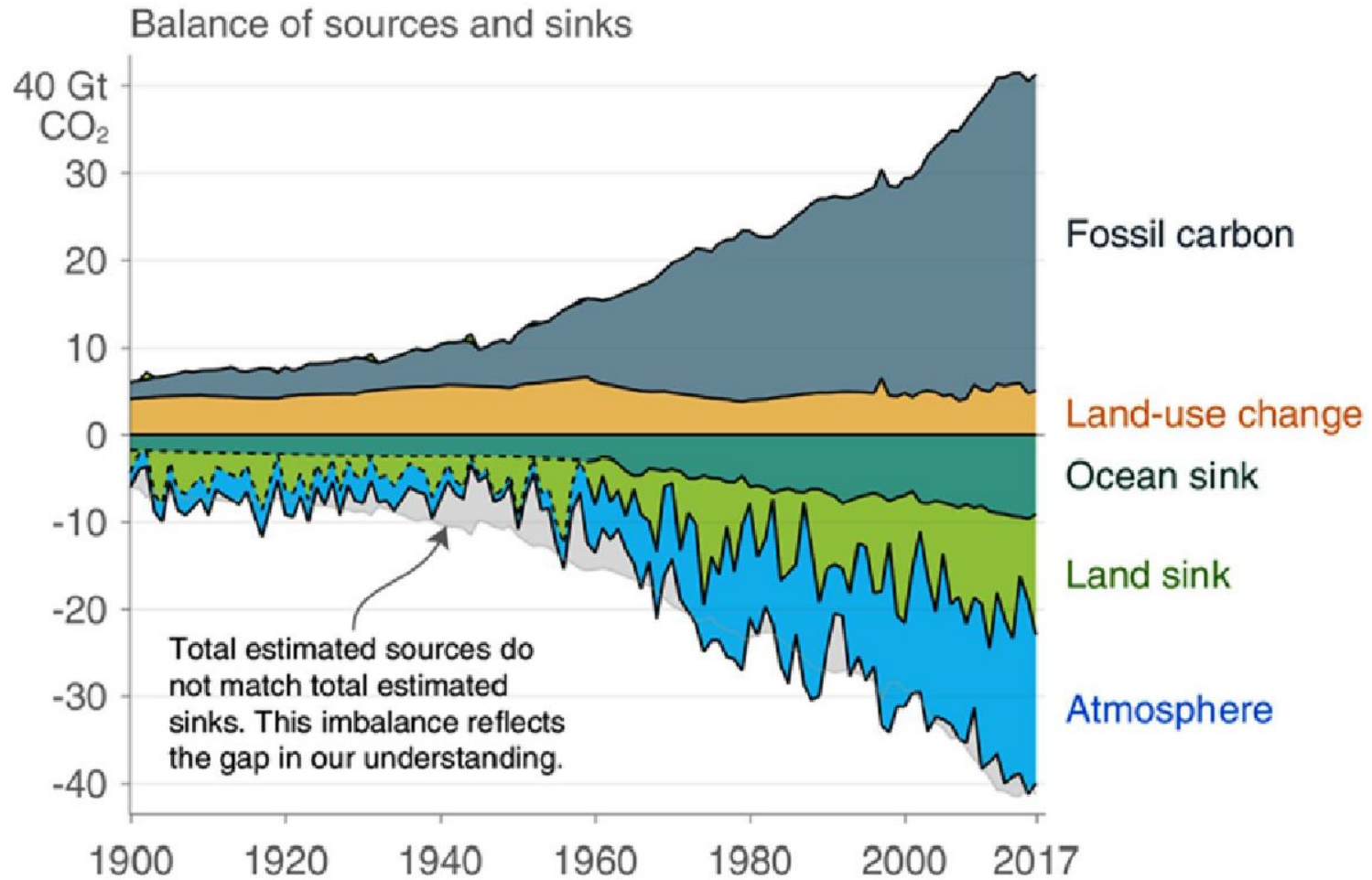
# Баланс двуокиси углерода

(GtCO<sub>2</sub>/yr ∨ GtC/yr )

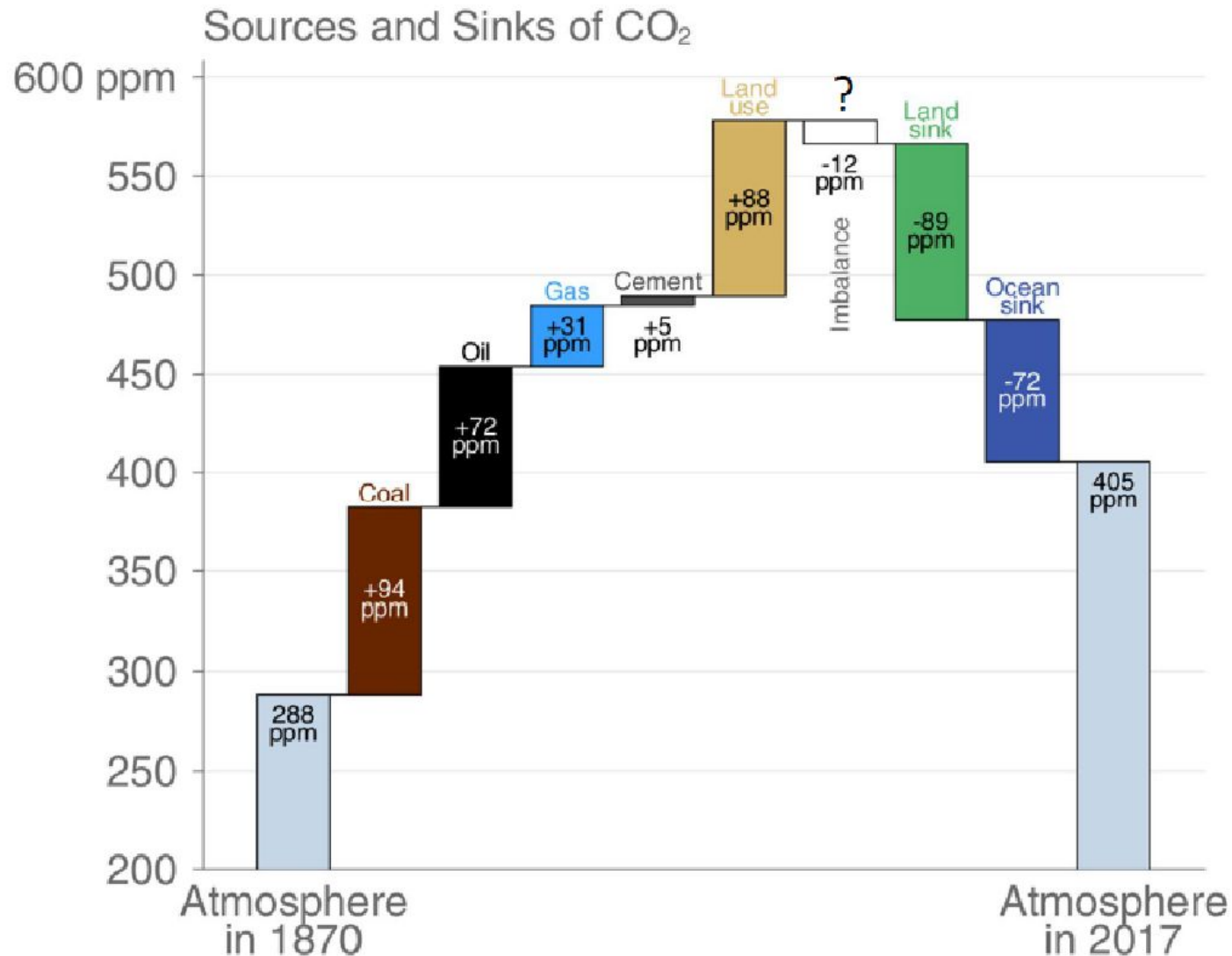
1 GtC = 3.664 GtCO<sub>2</sub>



# Неопределенность баланса



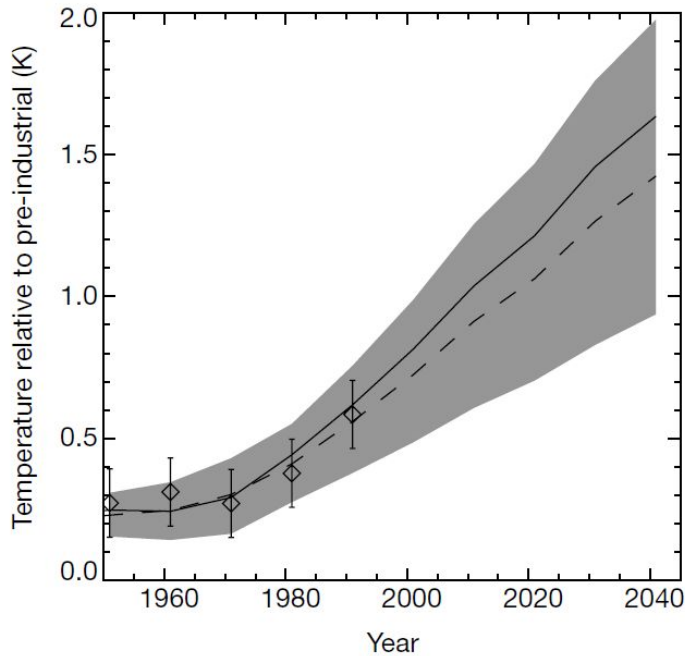
# Антропогенный эффект в атмосфере



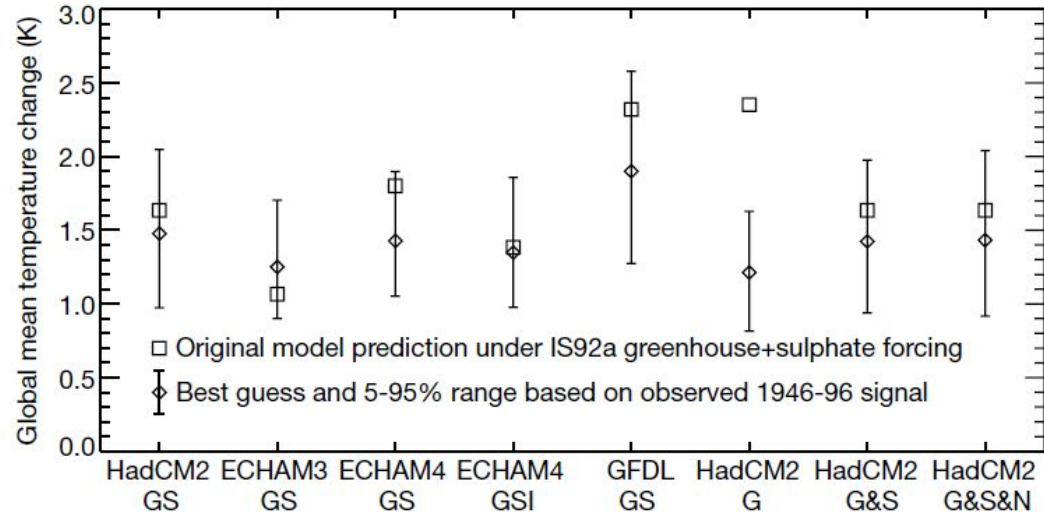
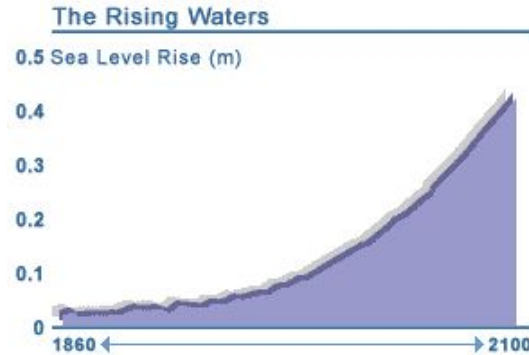
# Прогноз антропогенного изменения

## климата

Прогноз изменения средней глобальной поверхностной температуры к 2040 г. относительно средней температуры за 1896 – 1996 гг.



Изменение поверхностной температуры в 2040 г. по результатам расчетов различных GCM моделей



# «Черный лебедь» климатических прогнозов: пример

Большинство природных газов образуют гидраты, устойчивые при определённых термобарических условиях. Эти условия реализуются в морских донных осадках и мёрзлых породах (вечной мерзлоты). Преобладающими природными газовыми гидратами являются гидраты метана, огромные залежи которого найдены по всей Земле. Внезапное высвобождение большого количества газовых гидратов может быть причиной прошлых и будущих климатических изменений. Главный результат высвобождения метана температуры.



# Ограничение выбросов: международные действия

В 1995 г. Межправительственной экспертной группой по изменению климата (МГИК) опубликована «Платформа 2500 ученых». В 2001 г. коллективный документ опубликован в дополненном виде от лица почти тысячи специалистов. Главный вывод: усиление парникового эффекта в течение 1990—2100 гг. вызовет потепление климата на 1,5—5,8 °С.

Протокол к Рамочной конвенции ООН по климату, который был принят в Киото (Япония) в декабре 1997 г., впервые включал количественно установленные и закономерно обусловленные меры по уменьшению эмиссии парниковых газов индустриально развитыми странами. В соответствии с Протоколом, промышленные страны должны были снизить выбросы не менее чем на 5% ниже уровня 1990 г. в установленный период 2008-2012 гг.

Парижское соглашение, призванное регулировать меры по снижению выброса углекислого газа в атмосферу с 2020 года, было подготовлено взамен Киотского протокола в ходе Конференции по климату в Париже и принято консенсусом 12 декабря 2015 года, а подписано 22 апреля

# Отступление: международное сотрудничество

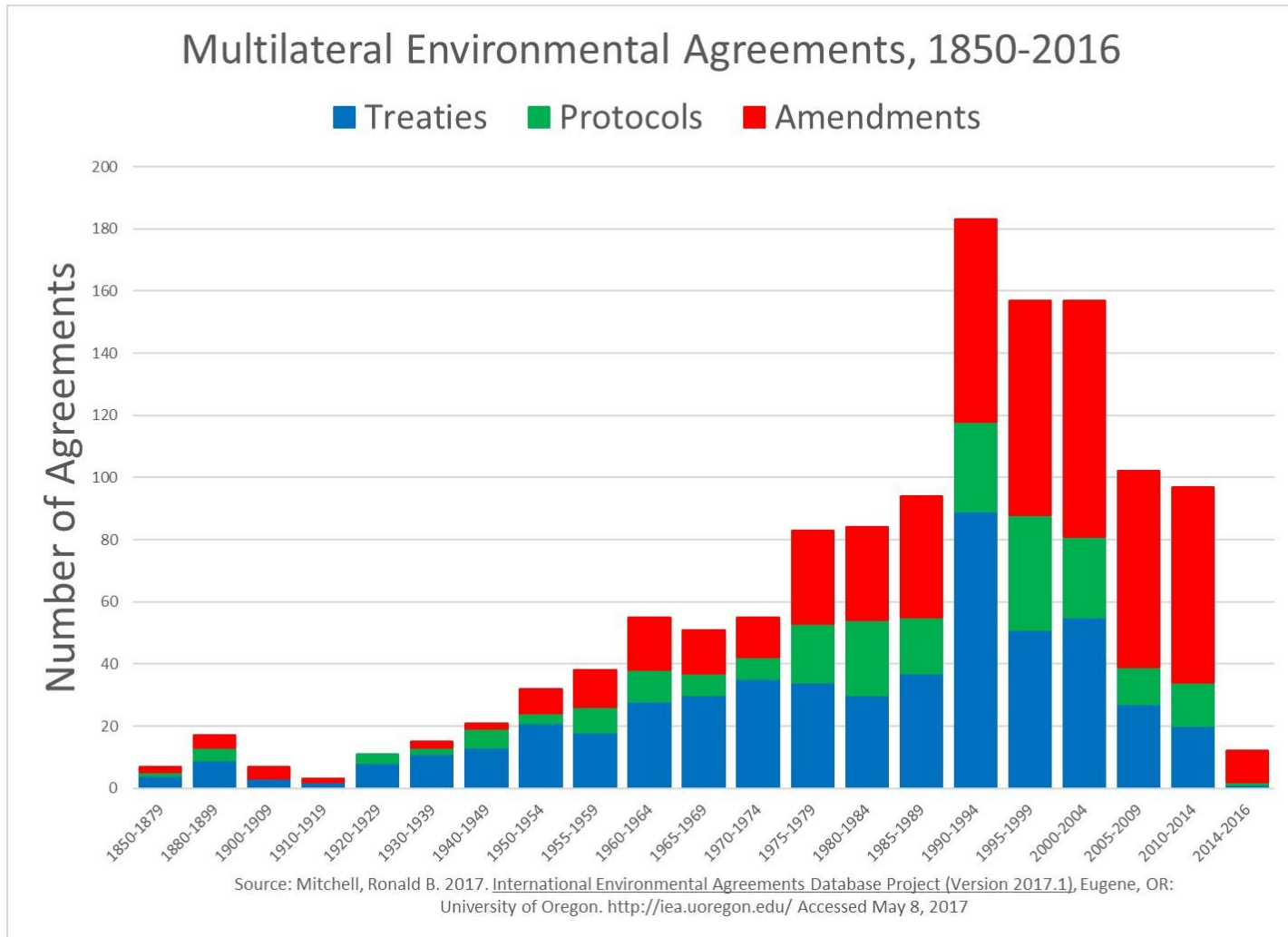
Общее число международных многосторонних (число стран – три и более) договоров об охране окружающей среды превышает семьсот, причем более двухсот из них заключалось под юрисдикцией Организации Объединенных Наций (ООН).

Первые три соглашения были подписаны уже к 1910 году (европейское рыболовство, предотвращение загрязнения Рейна), с 1998 по 2017 в среднем заключалось примерно 20 соглашений в год.

Эффективность заключенных соглашений, по мнению экспертов, весьма различна. Очень действенными стали договоры об ограничении выбросов хлорфторуглеродов (Монреальский протокол), об ограничении сброса радиоактивных отходов в океан. Малоэффективными оказались договоры о тропической древесине, большинство соглашений по рыболовству и контролю выбросов парниковых газов в атмосферу.



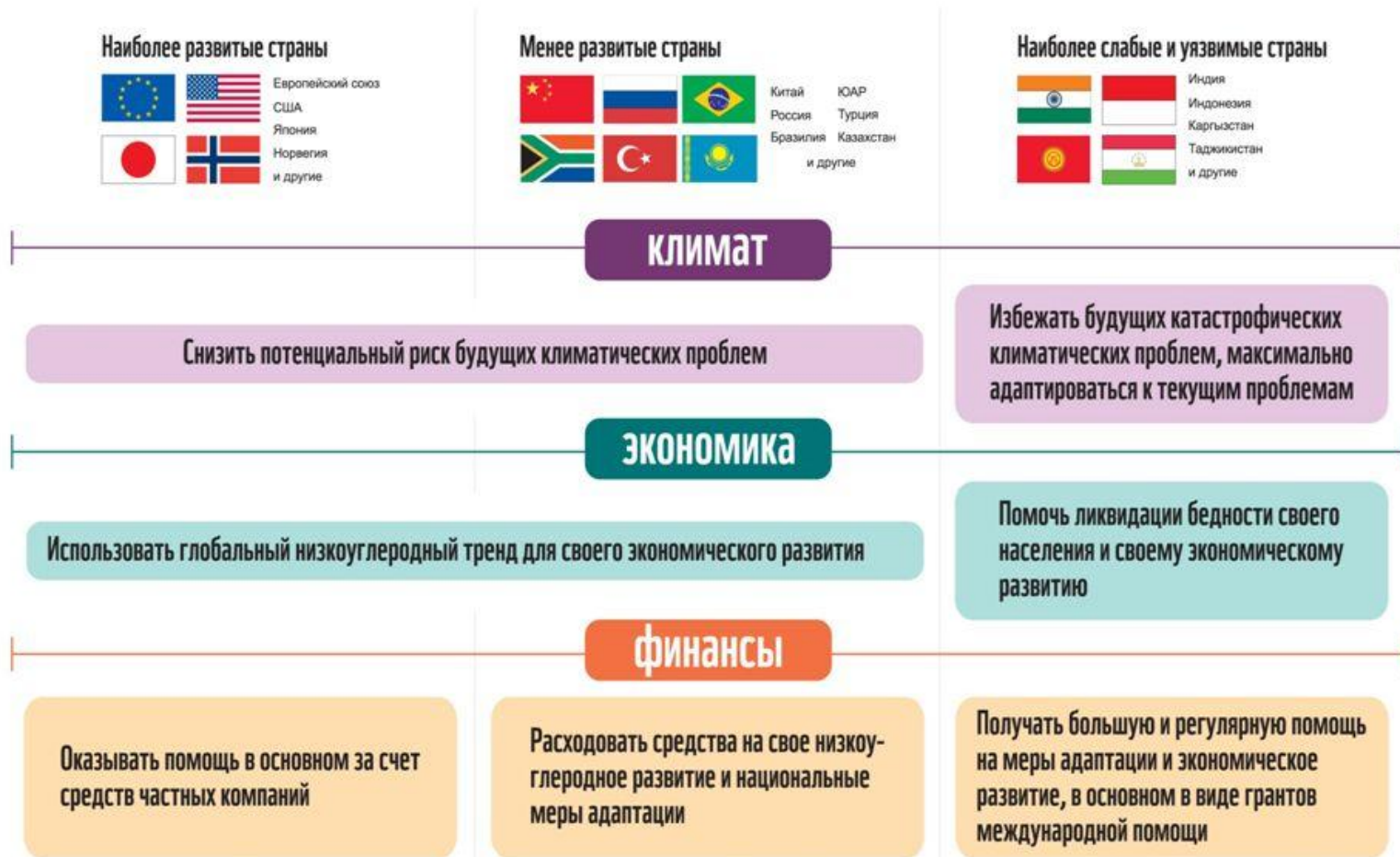
# Международное сотрудничество



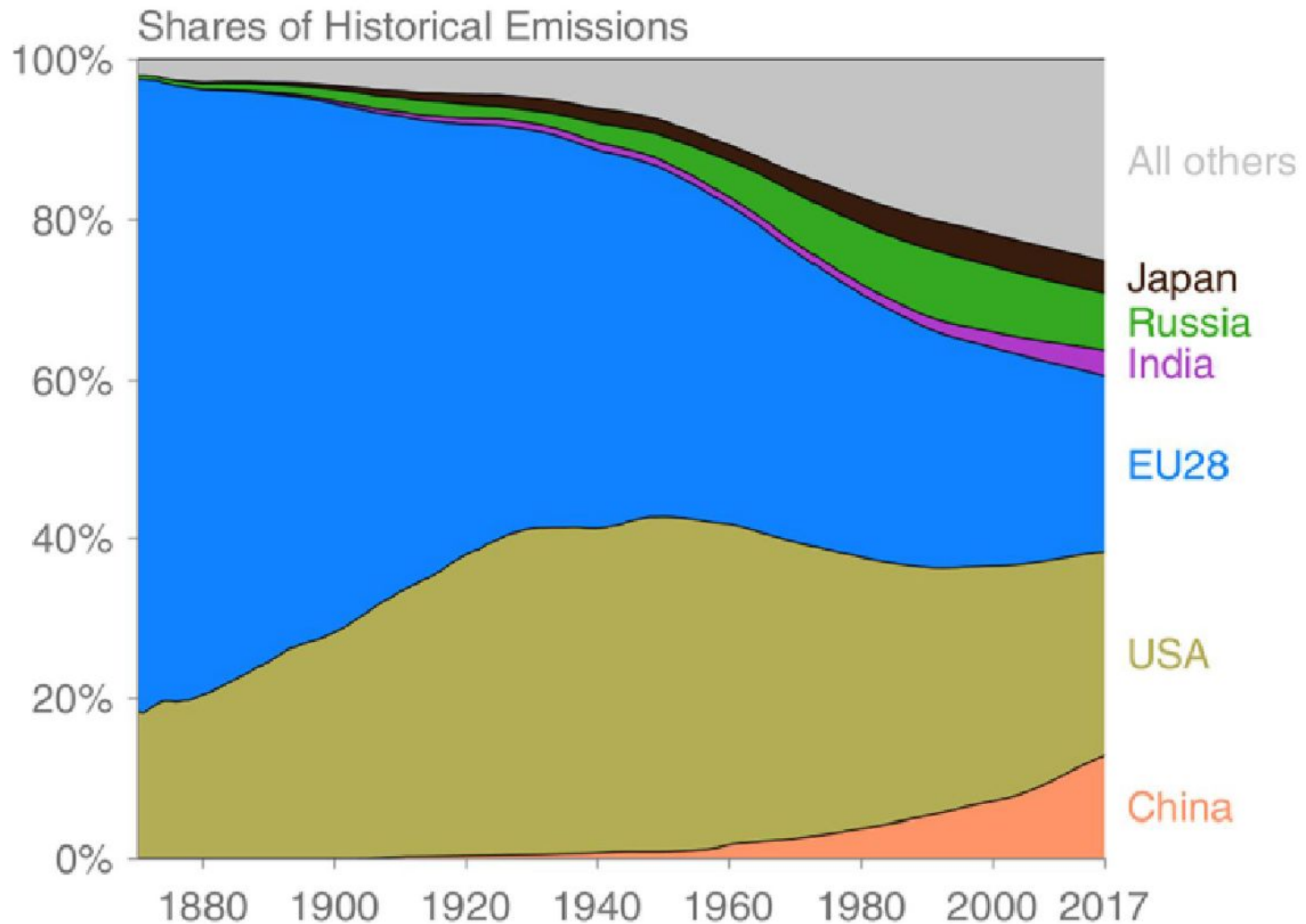
International Environmental Agreement Database,  
<http://iea.uoregon.edu>

# Парижское соглашение по климату (2015 г.)

## Цели стран в „Парижском пакете“



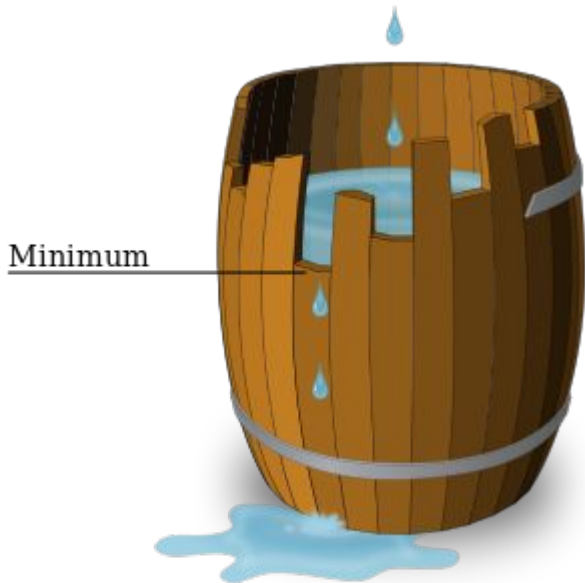
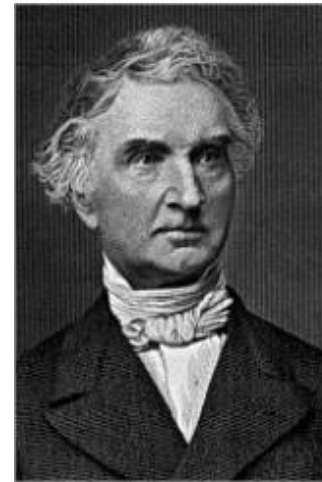
# Национальная доля парниковых выбросов



# Отступление: Закон лимитирующего фактора

Наиболее важным для устойчивости системы является фактор, наиболее отклоняющийся от своего оптимального значения.

Ю́стус фон Ли́бих (1803 -- 1873) — немецкий учёный, один из основателей агрохимии.



Бочка  
Либиха