

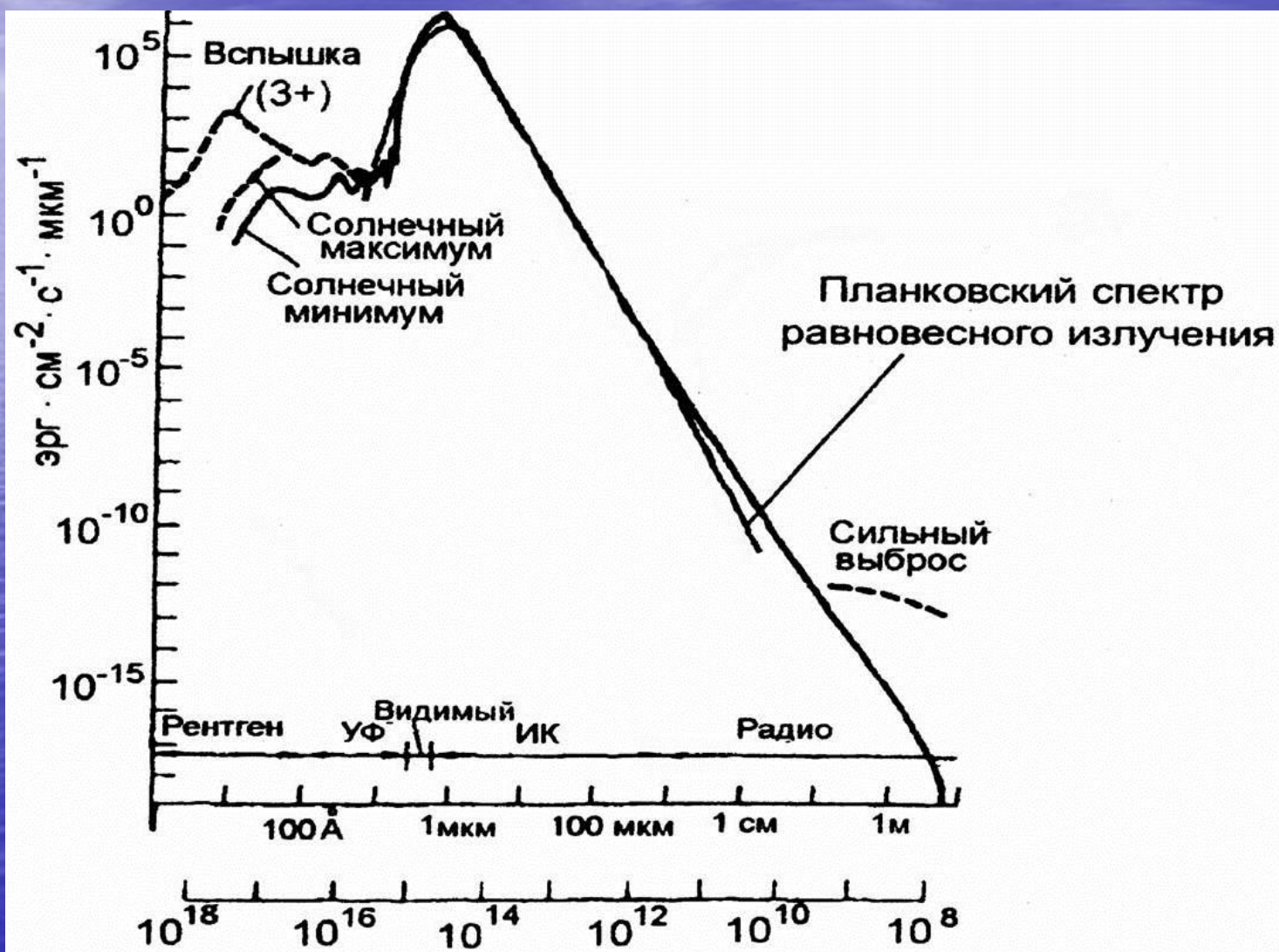
Глобальная экология и глобальная безопасность

Лекция 5. Тепловой баланс планеты; ее глобальный и локальный температурный режим

(С) Аржанников А. В.

- Спектральный состав излучения, поступающего от Солнца на Землю
- Спектр пропускания земной атмосферы
- Представление о парниковом эффекте
- Локальное энергопотребление и влияние на него различных факторов
- Локальное повышение температуры
- Возможные объяснения глобального изменения температуры
- Океан как термостат планеты

Солнечный спектр



ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ ВРЕМЯ, БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЛН. ЛЕТ НАЗАД



Состав атмосферы

Постоянные компоненты воздуха

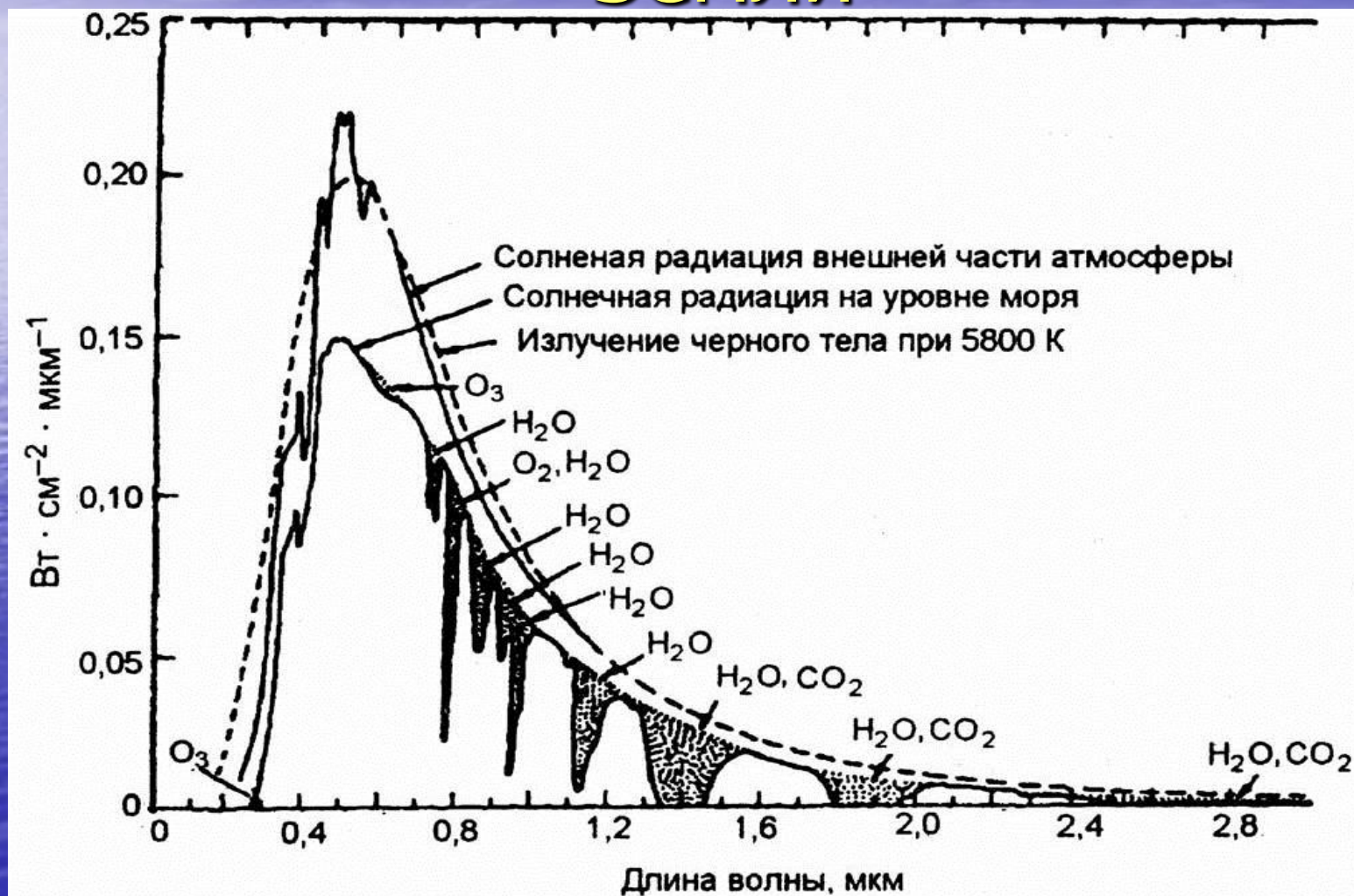
Компонента	Формула	Отн. молекул. масса	% объема
Азот	N ₂	28.016	78.110±0.004
Кислород	O ₂	31.9986	20.957 ±0.001
Аргон	Ar	39.942	0.937 ±0.001
Неон	Ne	20.182	(18.18 ±0.04)10 ⁻⁴
Гелий	He	4.003	(5.24 ±0.004)10 ⁻⁴
Криптон	Kr	83.80	(1.14 ±0.01)10 ⁻⁴
Ксенон	Xe	131.3	(0.087 ±0.001)10 ⁻⁴
Водород	H ₂	2.016	0.5*10 ⁻⁴
Метан	CH ₄	16.043	2*10 ⁻⁴
Закись азота	N ₂ O	44.015	(0.5 ±0.1)10 ⁻⁴

Состав атмосферы

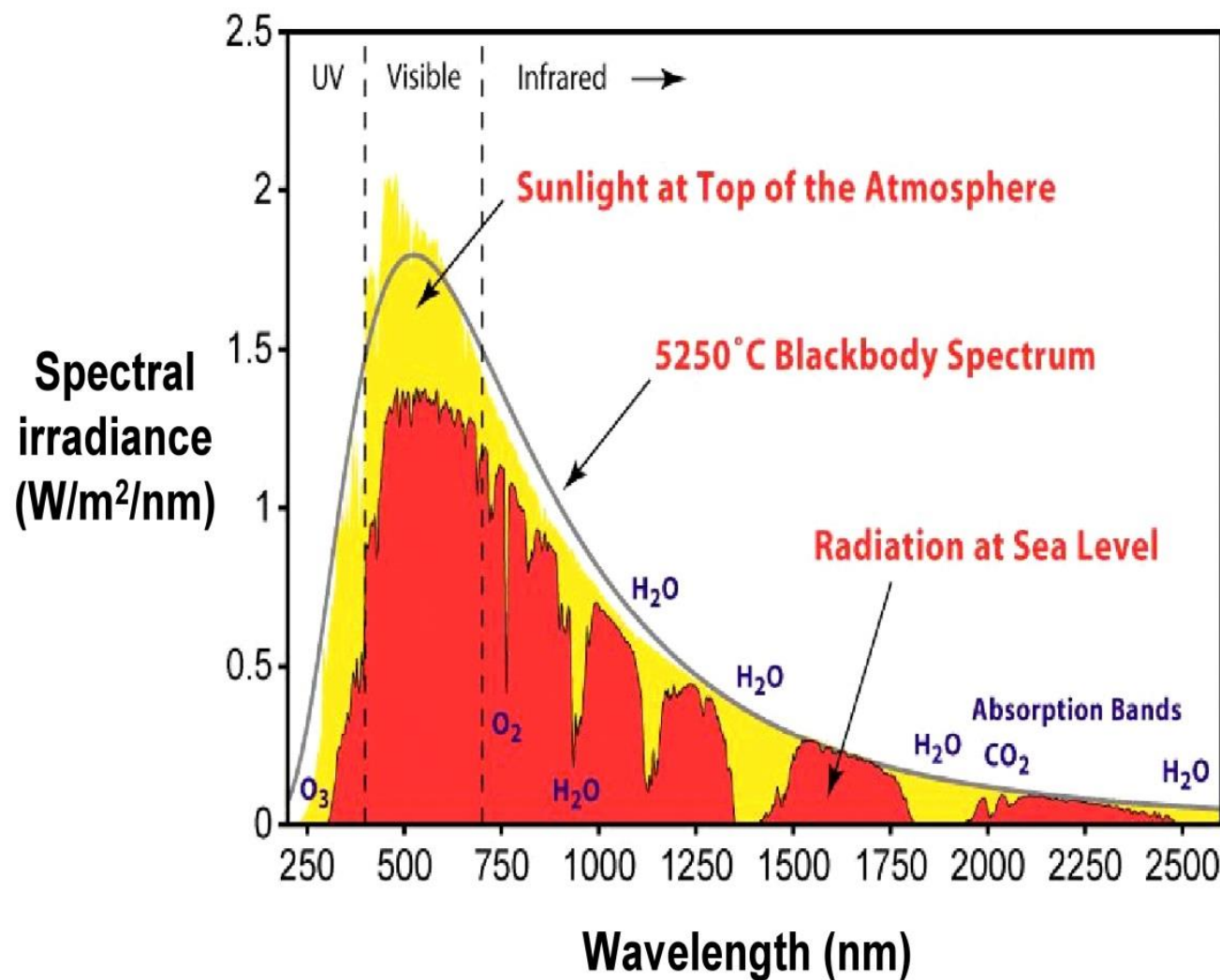
Переменные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Онт. молекул. масса	% объема
Вода	H_2O	18.005	0-7
Двуокись углерода	CO_2	44.009	0.01-0.1 (у поверхности среднее 0,032)
Озон	O_3	47.998	0-0,01
Двуокись серы	SO_2	64.064	0-0,0001
Двуокись азота	NO_2	46.007	0-0,000002

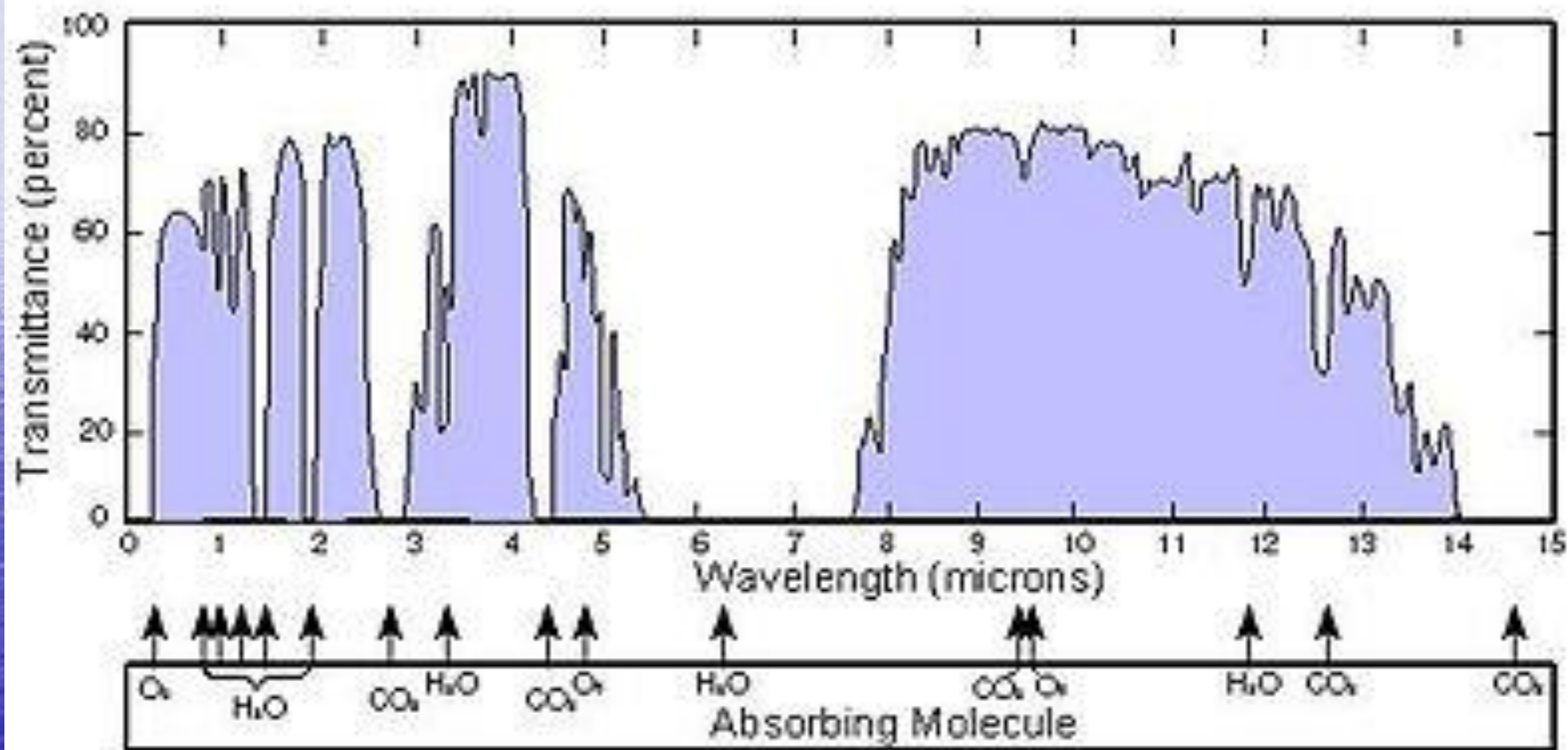
Энергетический спектр солнца и полосы поглощения в атмосфере Земли



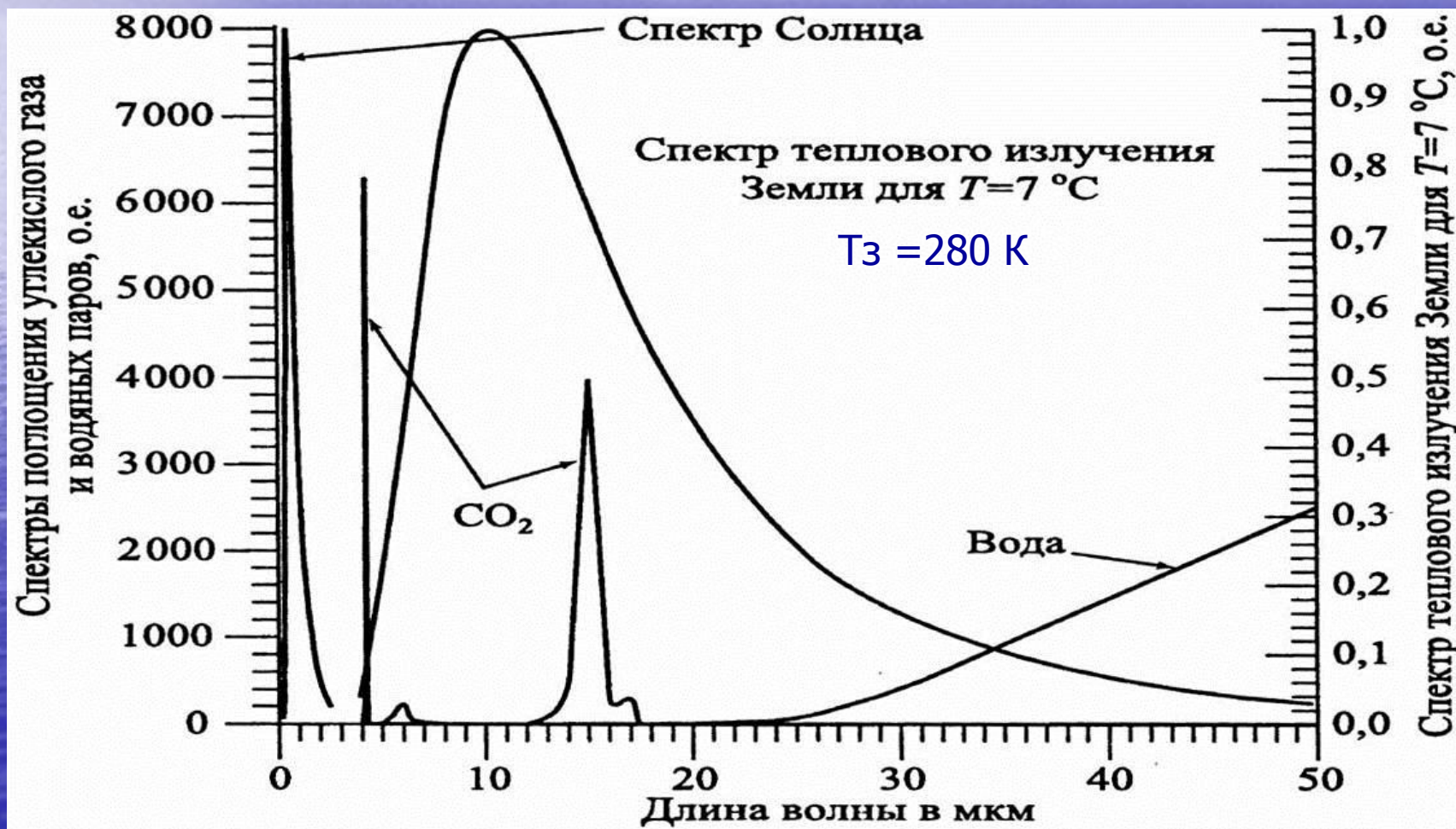
Энергетический спектр солнца и полосы поглощения в атмосфере Земли



Полосы поглощения в атмосфере Земли



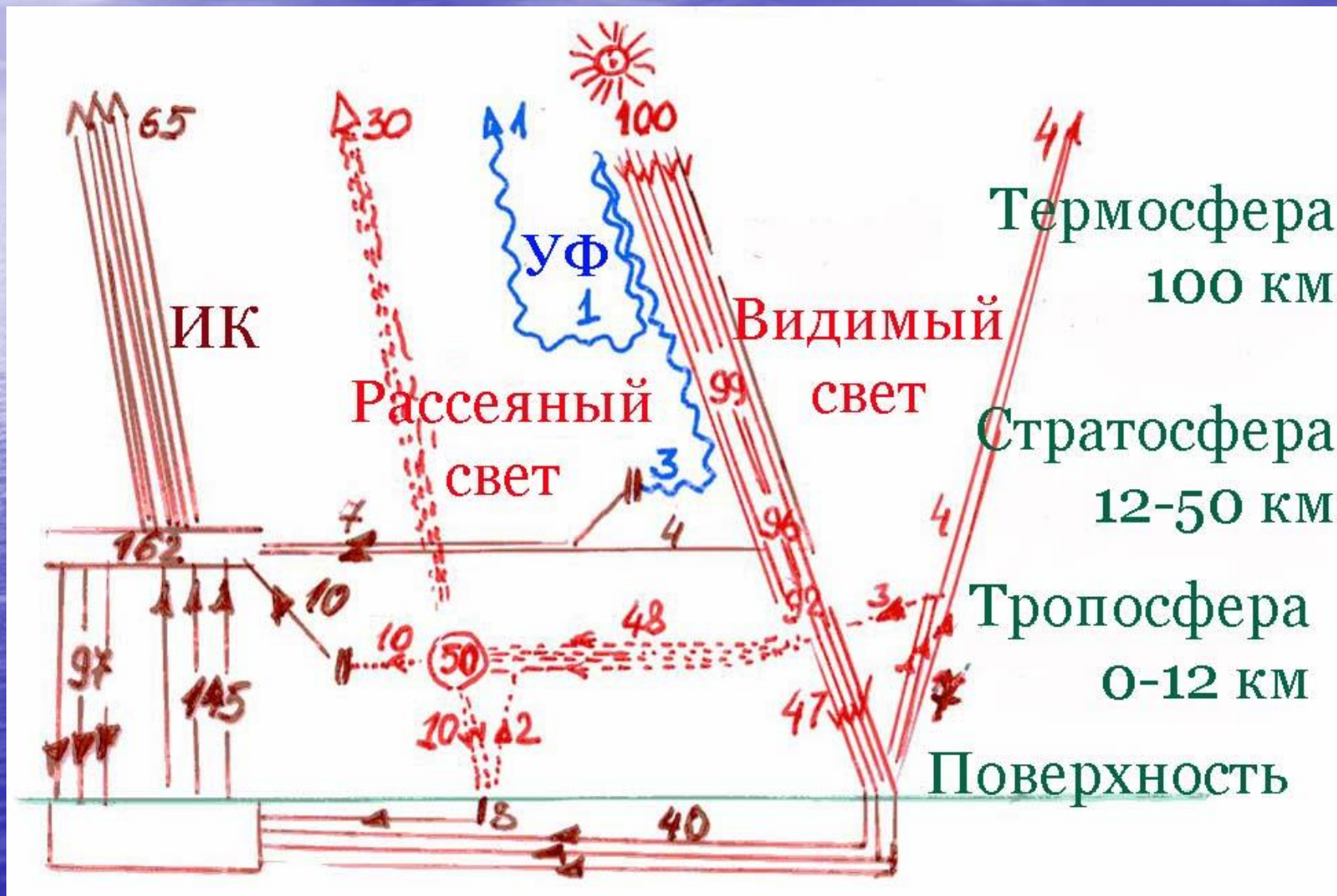
Взаимное расположение спектров излучения Солнца и Земли

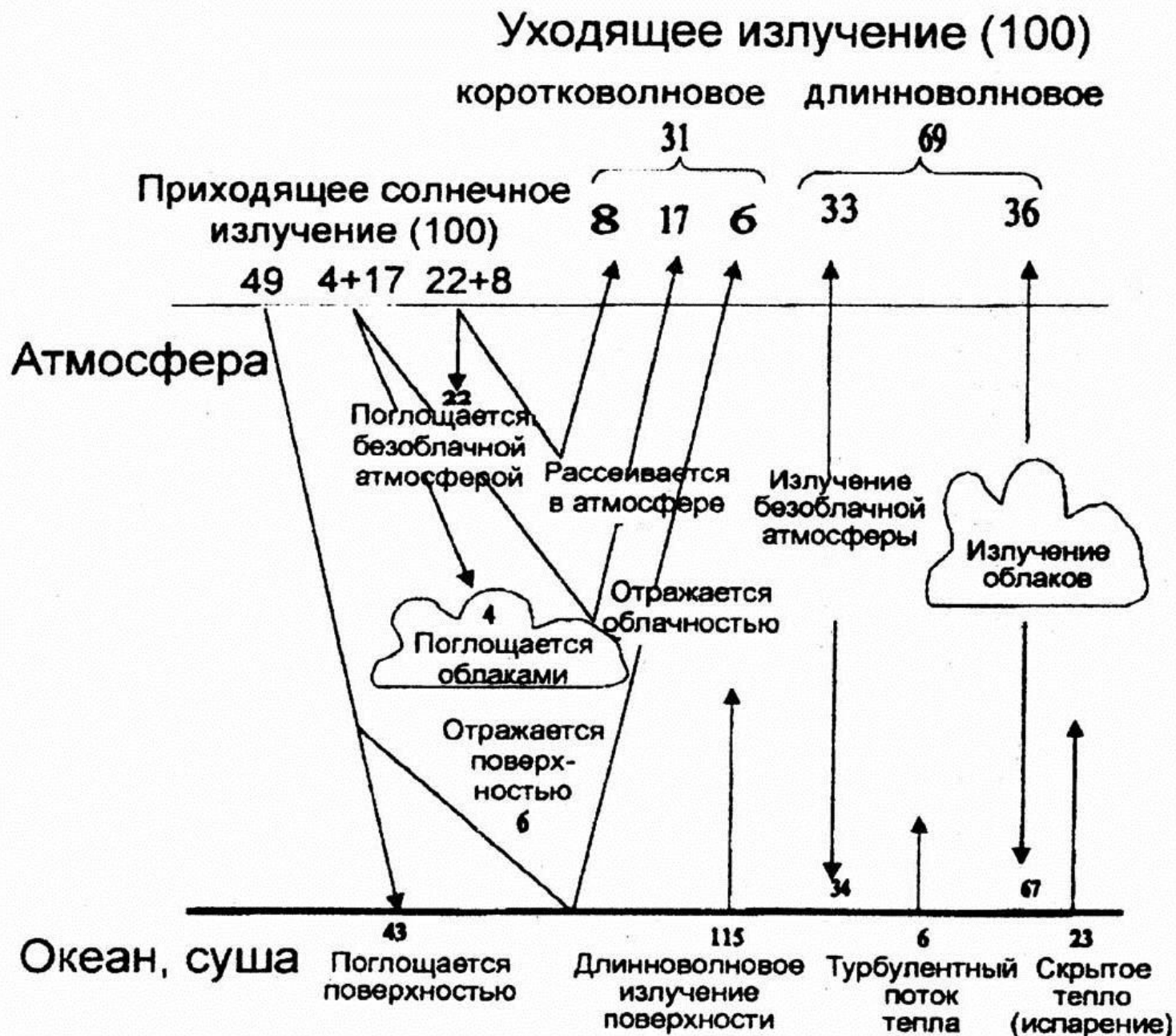


48% из поступающей от Солнца мощности приходится на видимую область спектра, при этом максимум соответствует желто-зеленому цвету. Около **45% мощности** излучения содержится в инфракрасной области спектра.

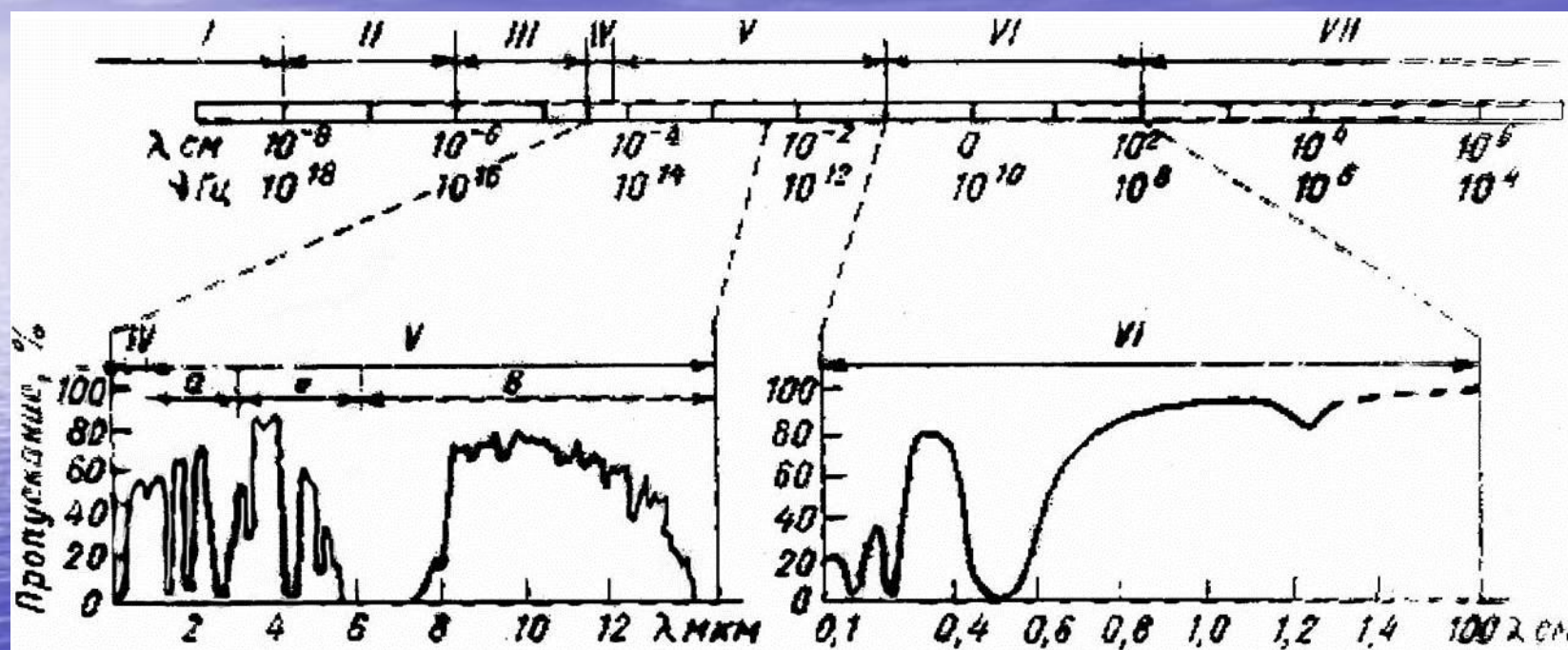


Схема теплового баланса земли





Спектр пропускания безоблачной атмосферы



I – гамма, II – рентгеновское, III – ультрафиолетовое, IV – видимое, V – инфракрасное (зоны: а – ближняя, б – средняя, в – дальняя), VI – сверхвысокочастотная, VII – радио.

Парниковые газы

- Основные парниковые газы: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), гидрофторуглероды (ГФУ), перфторуглероды (ПФУ), гексафторид серы (SF_6);
- прекурсоры озона или газы с косвенным парниковым эффектом: окись углерода (CO), окислы азота (NO_x), летучие неметановые органические соединения (ЛНОС);
- прекурсоры аэрозолей: диоксид серы (SO_2);

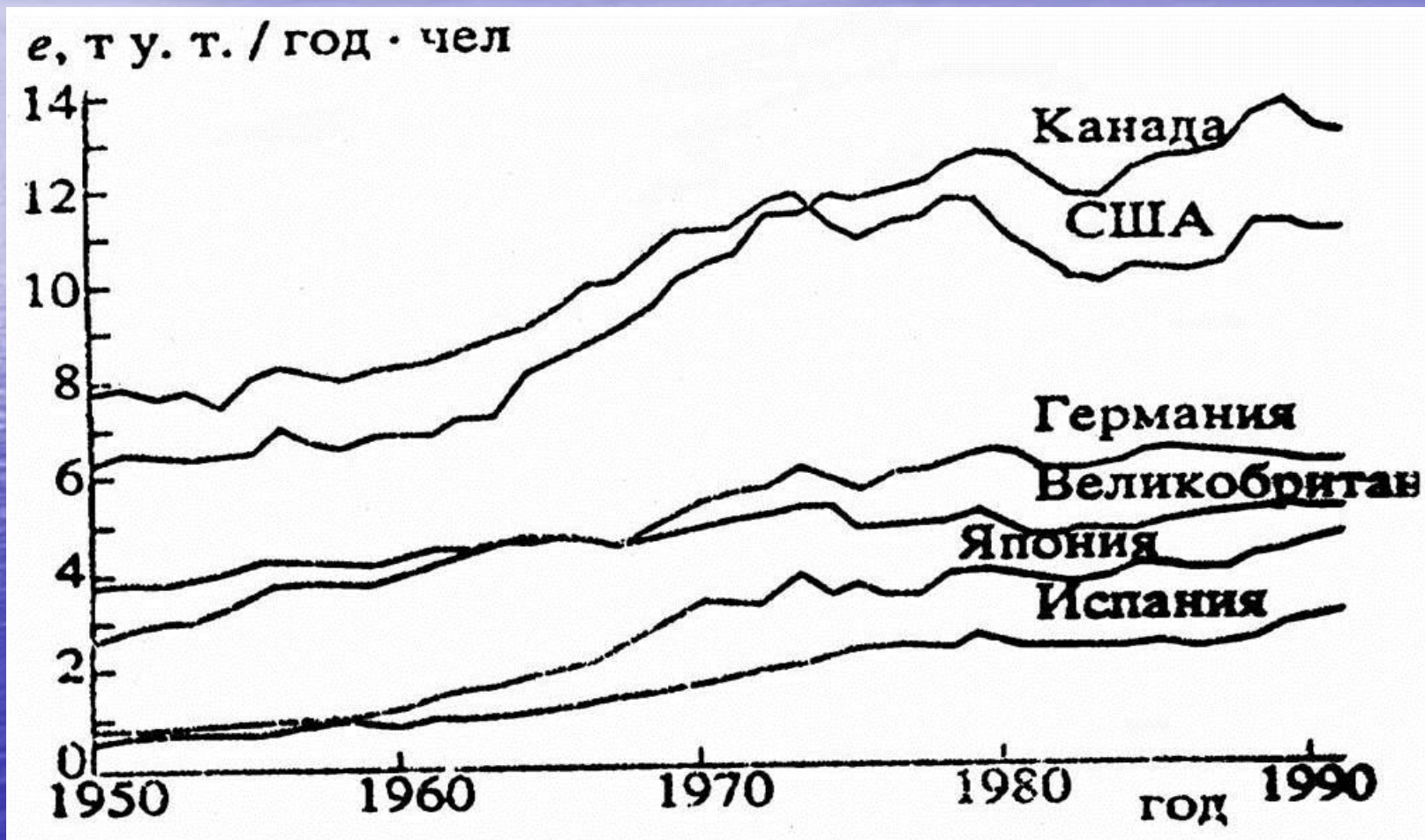


Парниковые газы

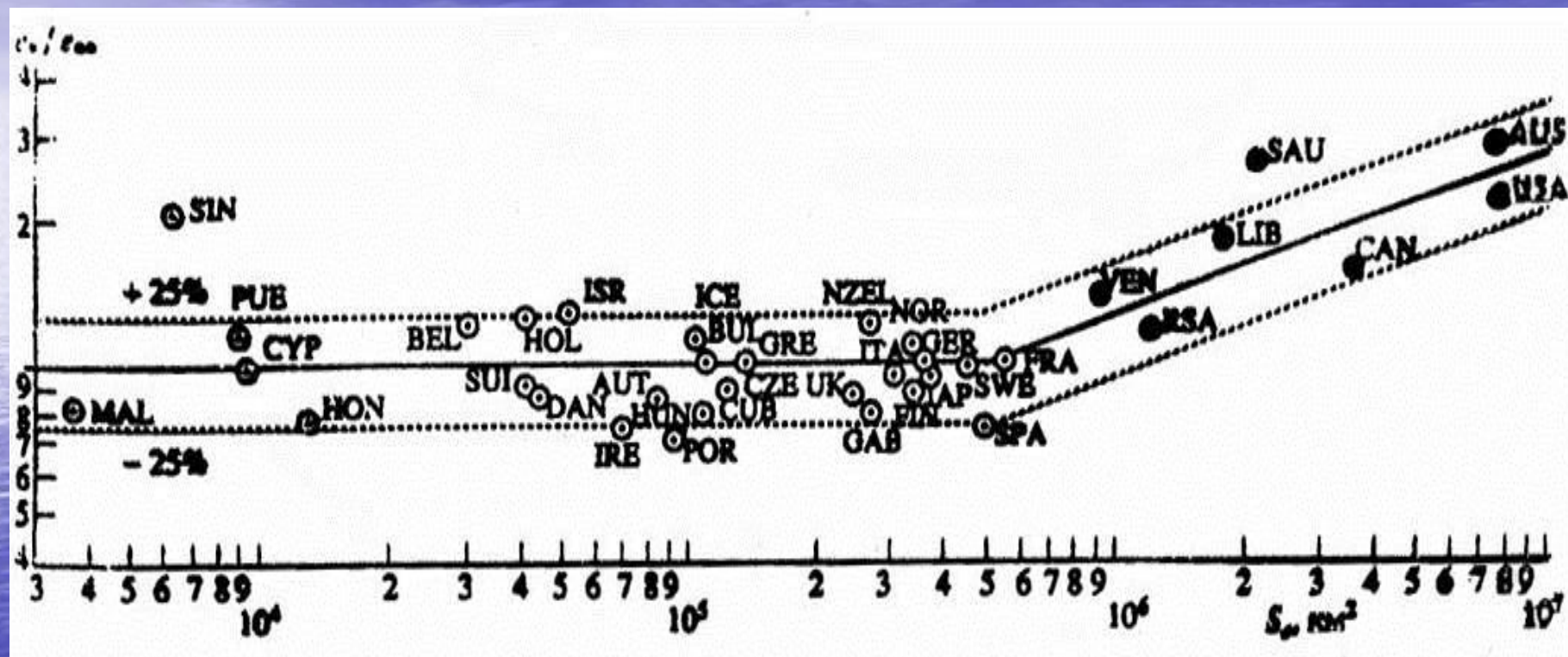
Парниковые газы	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	O ₃	CFCI ₃	CF ₂ Cl ₂
Центр полосы (мкм)	15.0	4.54	3.3	9.6	9.22	9.13
		7.78	7.66		11.82	8.68
		8.6				10.93
		17				

Механизм: атмосфера пропускает коротковолновое излучение, парниковые газы поглощают уходящую длинноволновую радиацию и переизлучают поглощенную энергию во всех направлениях. Увеличение концентрации парниковых газов приводит к нагреву поверхности Земли и нижней атмосферы.

Потребление энергии на душу населения в развитых странах

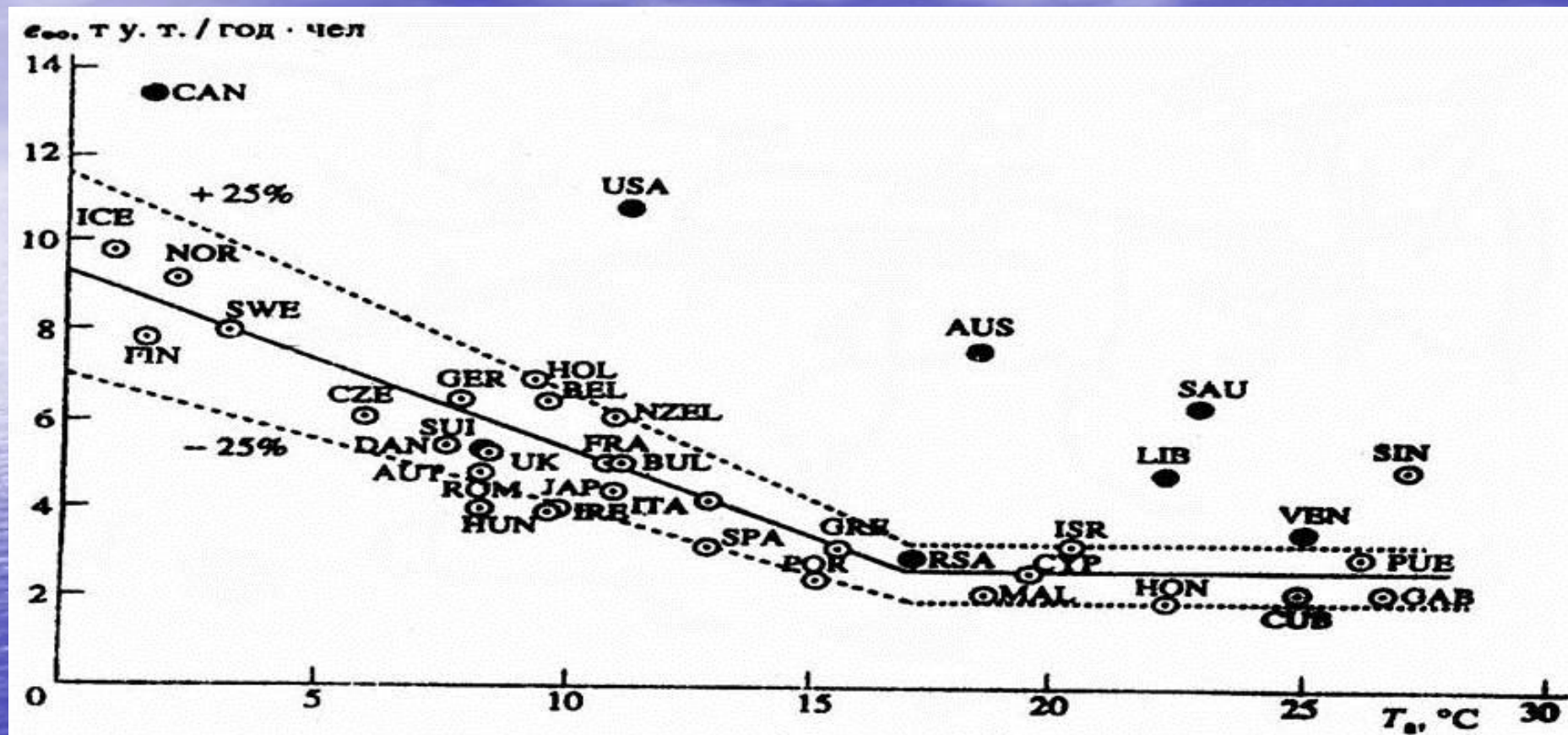


Влияние географических условий



Зависимость удельного потребления энергии в постиндустриальном обществе от эффективной площади страны.

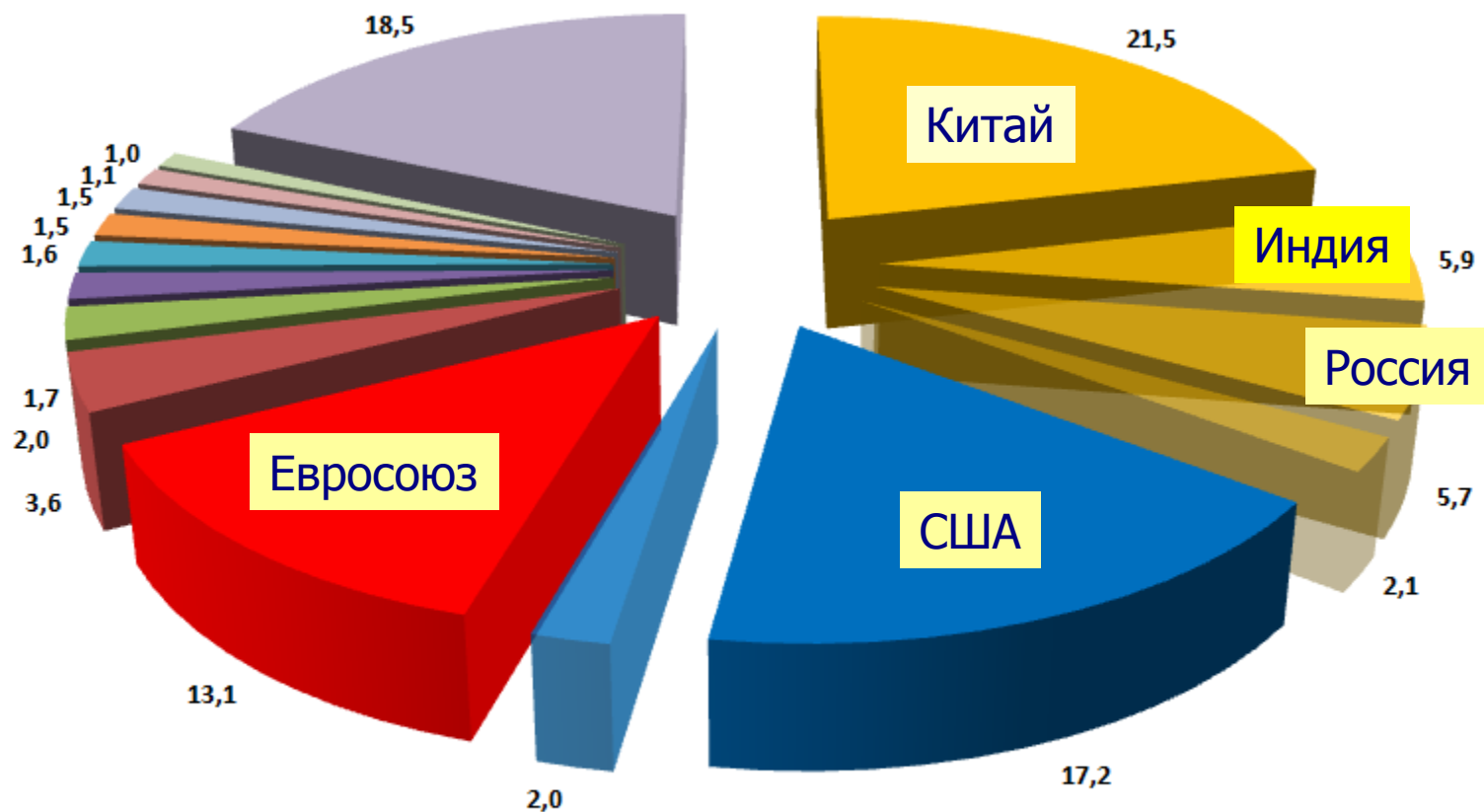
Влияние климатических условий



Зависимость удельного потребления энергии в постиндустриальном обществе от среднегодовой температуры.

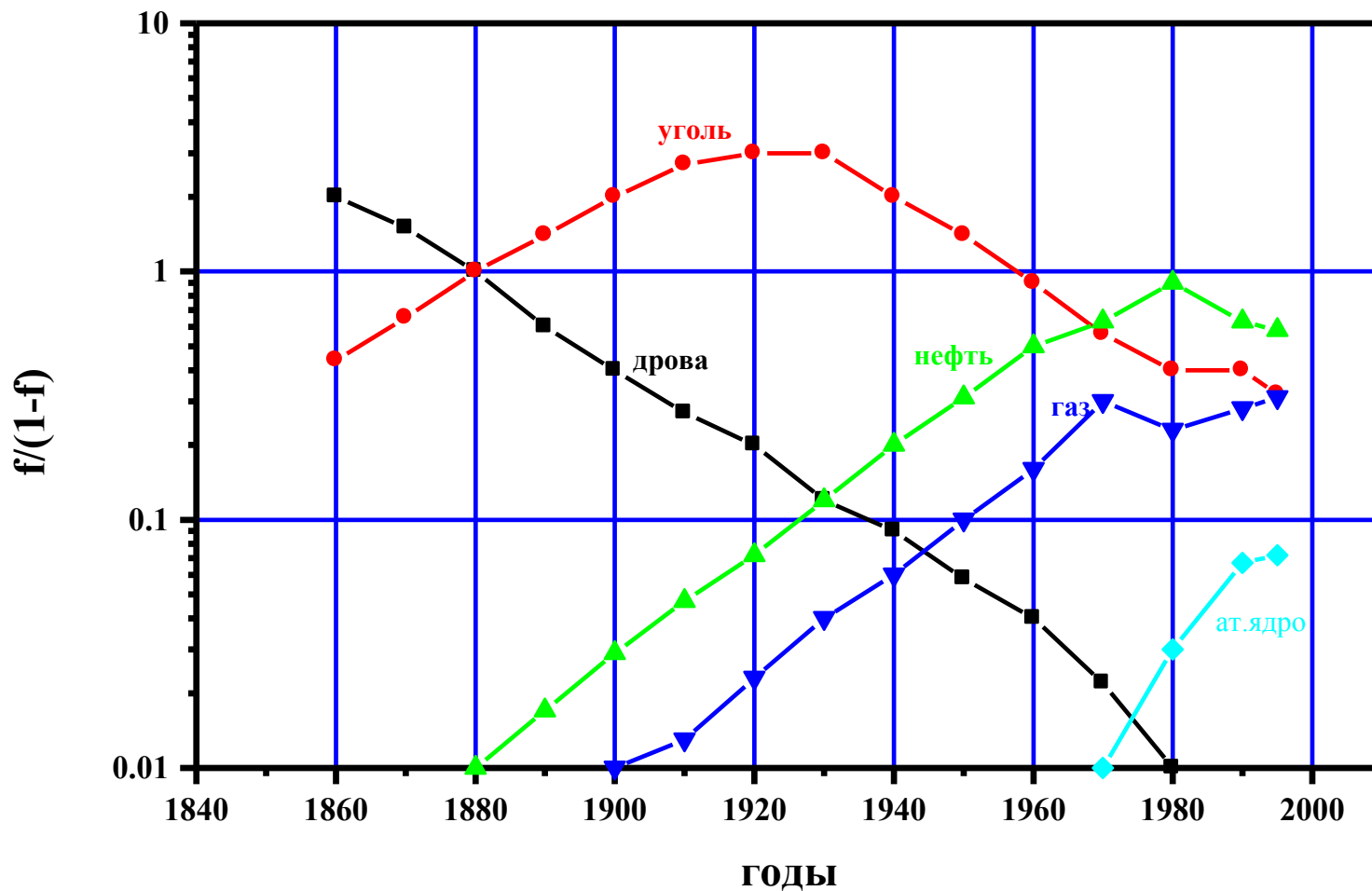
Распределения потребления энергии в мире по группам стран

Доля в мировом потреблении энергии по странам в 2011 году, %

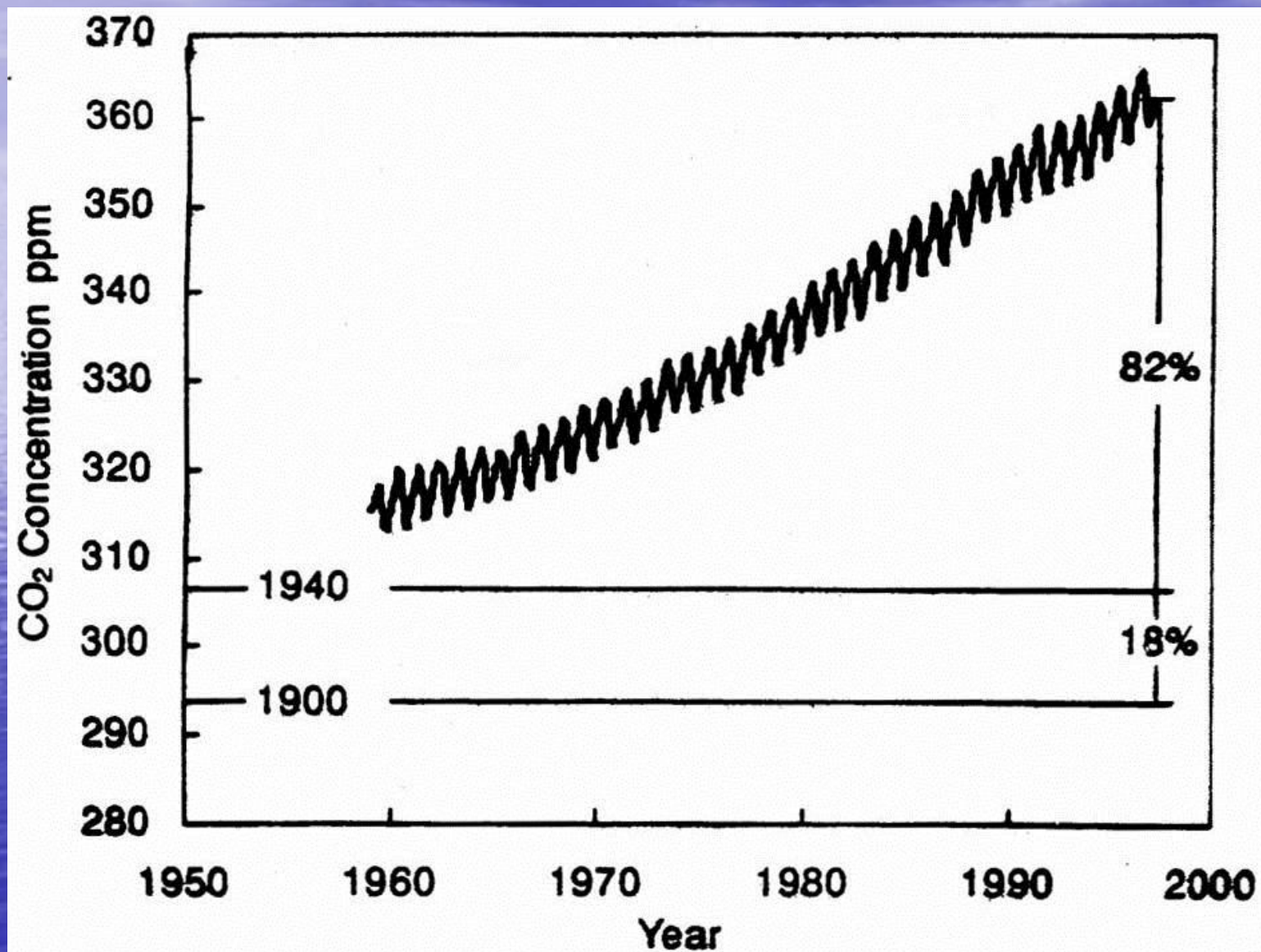


- | | | | | | |
|----------|--------|-------------|-----------|-----------|-------------------|
| Китай | Индия | Россия | Бразилия | США | Канада |
| Евросоюз | Япония | Южная Корея | Иран | Индонезия | Саудовская Аравия |
| Мексика | ЮАР | Украина | Остальные | | |

Изменение удельного веса первичных источников энергии



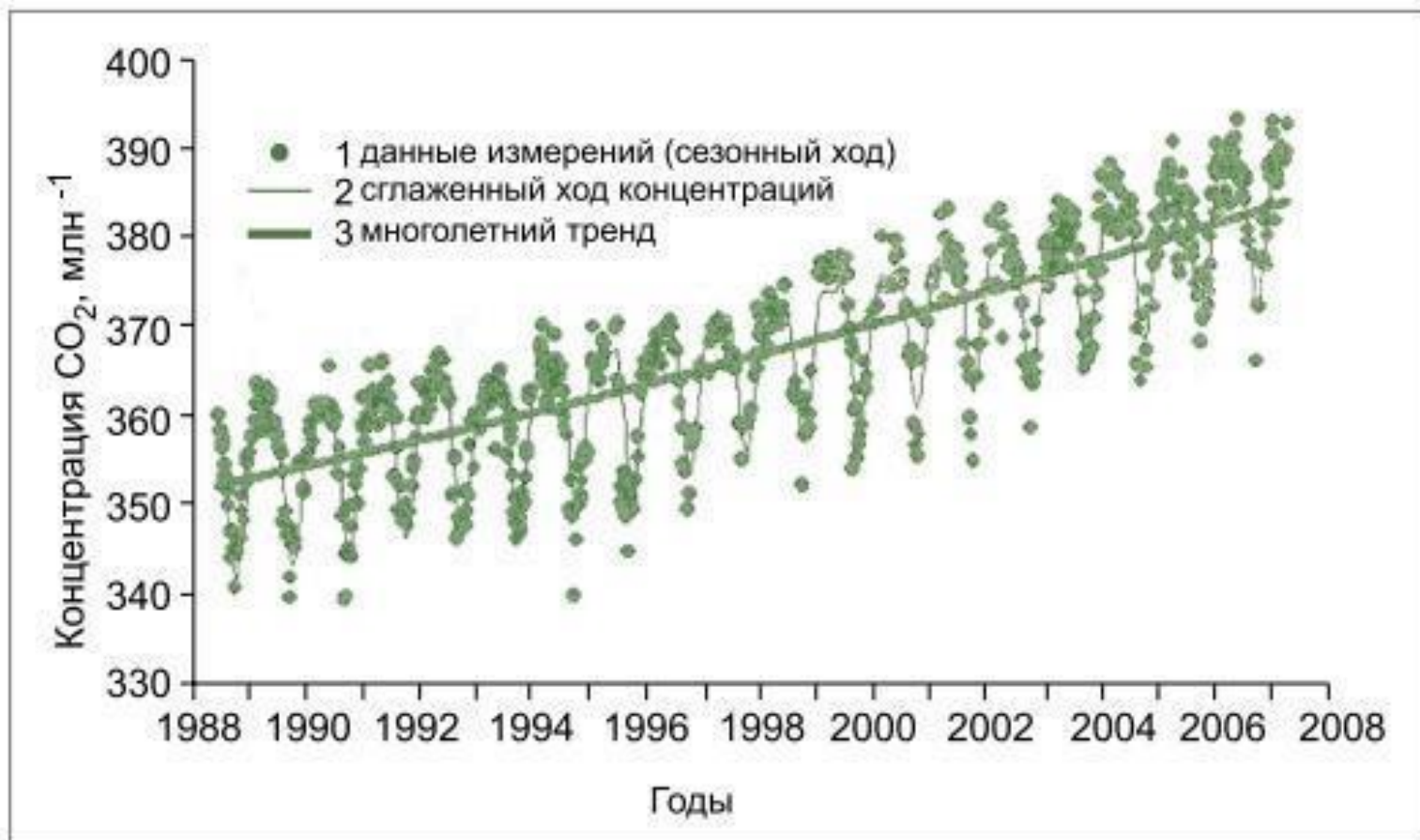
Концентрация CO_2 в атмосфере на Гавайях.



Изменение концентрации CO_2 в атмосфере

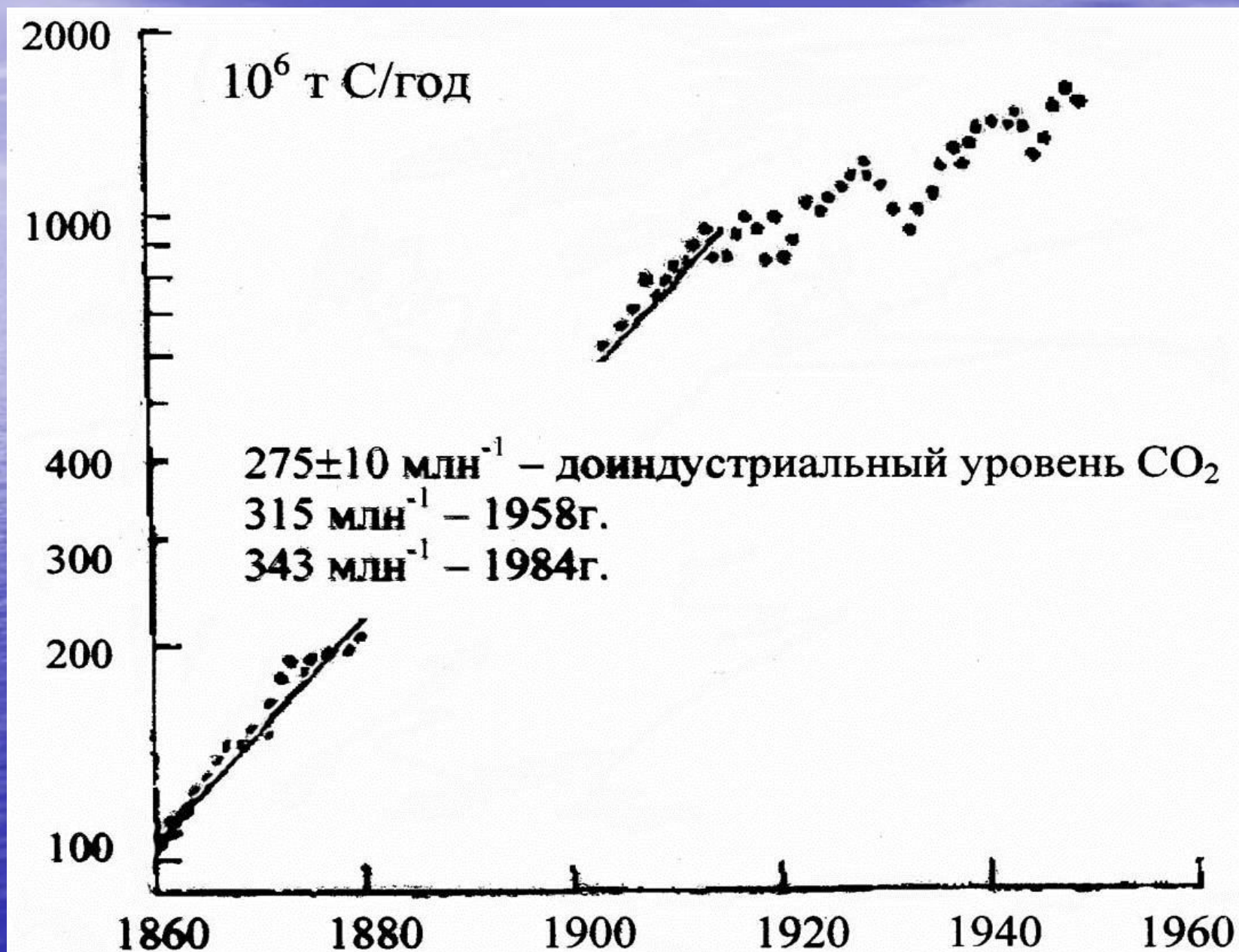
Изменение концентрации CO_2 на станции Териберка
за последние 20 лет

Кольский полуостров

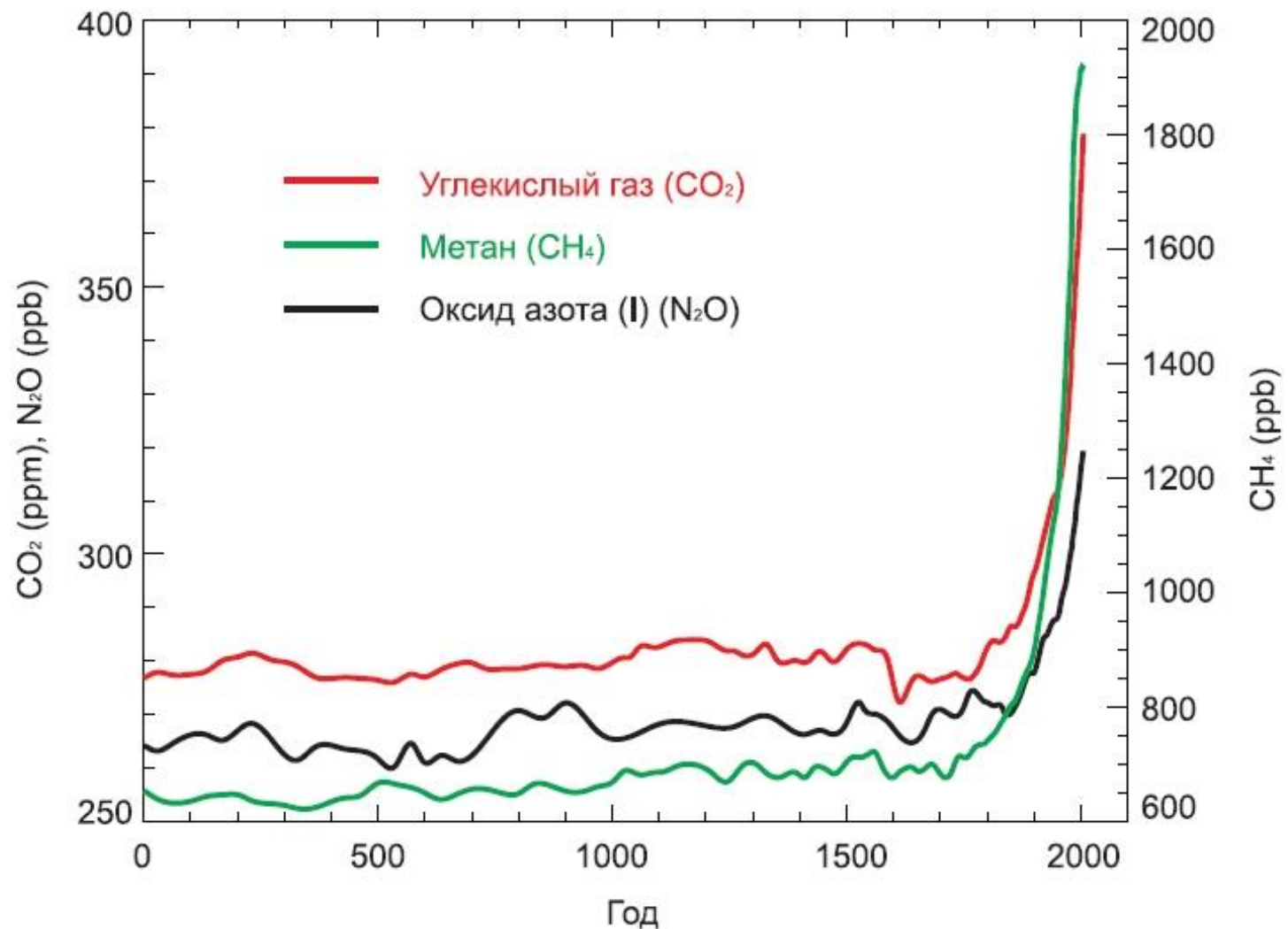


Источник: оценочный доклад об изменении климата и их последствиях на территории РФ.
Росгидромет, М., 2008, т.1.

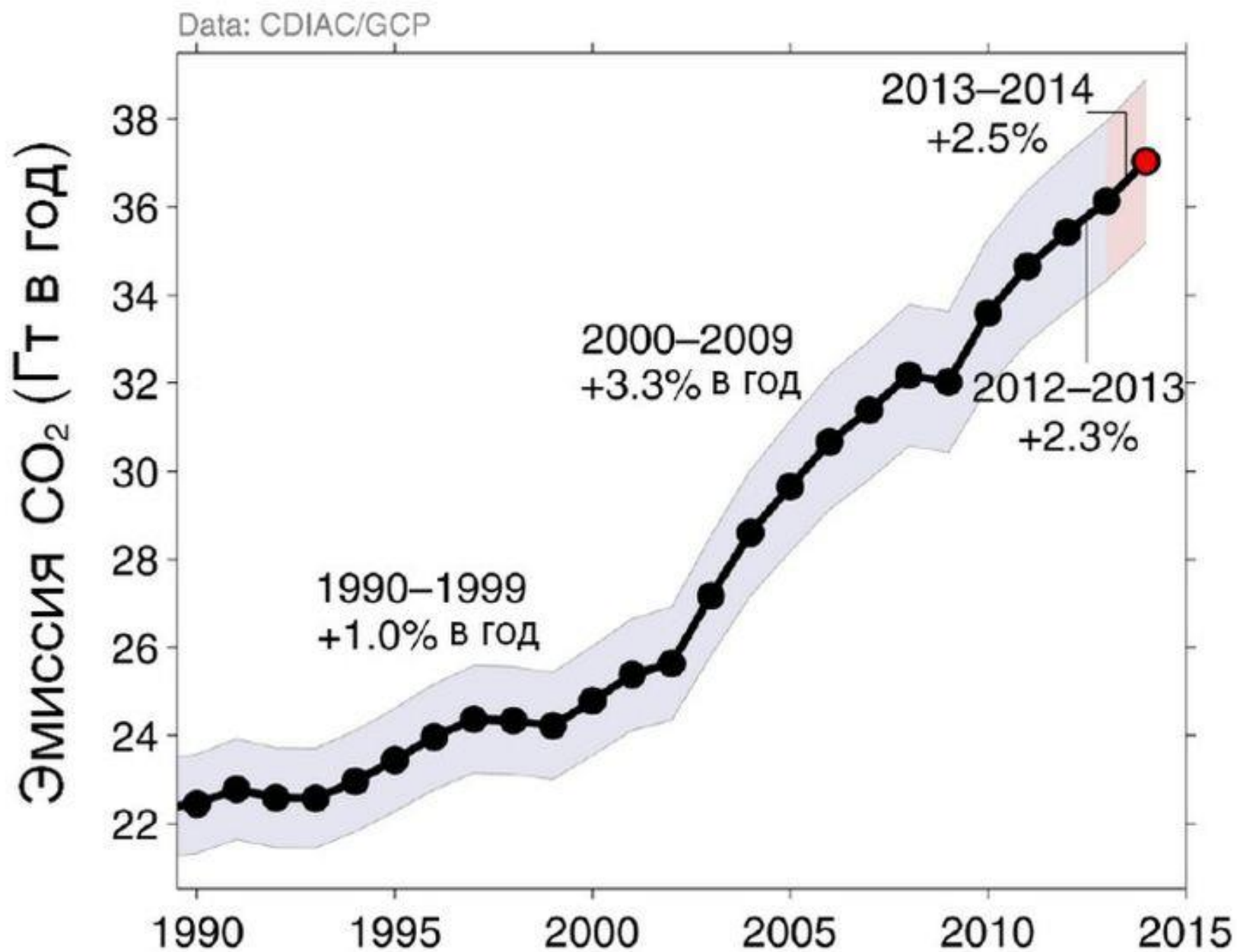
Нарастание поступления CO_2 в атмосферу



Концентрация парниковых газов



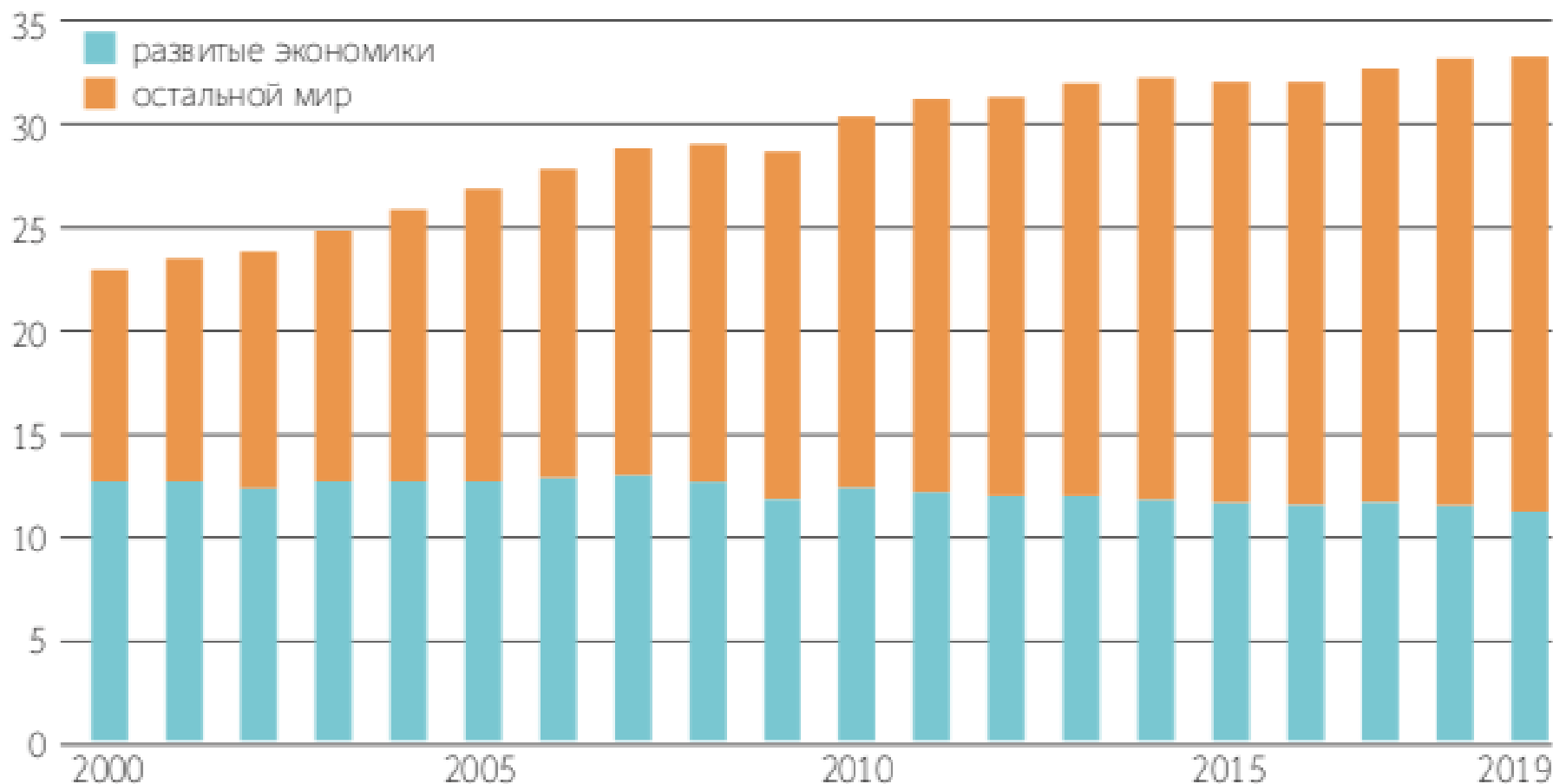
Единицы измерения: для CO_2 частей на миллион (ppm), для метана и оксида азота (I) частей на миллиард (ppb) – число молекул газа на миллион или миллиард молекул всех газов воздуха



Источники: [CDIAC](#); [Le Quéré et al 2014](#); [Global Carbon Budget 2014](#)

Выбросы углерода (CO₂) в течение последних 20-ти лет

Выбросы CO₂ в мировом энергетическом секторе
Гт



Выбросы углерода (CO₂) в 2018 году

№	Страна	млн т/год	в %
1	Китай	9428,7	27,8
2	США	5145,2	15,2
3	Индия	2479,1	7,3
4	Россия	1550,8	4,6
5	Япония	1148,4	3,4
6	Германия	725,7	2,1
7	Респ. Корея	697,6	2,1
8	Иран	656,4	1,9
9	Сауд. Аравия	571,8	1,7
10	Канада	550,3	1,6

Выбросы CO₂ перестали расти впервые за три года, оставшись на уровне 33,3 гигатонн (Гт) в 2019 г., по данным МЭА. При этом мировая экономика в прошлом году выросла на 2,9%.

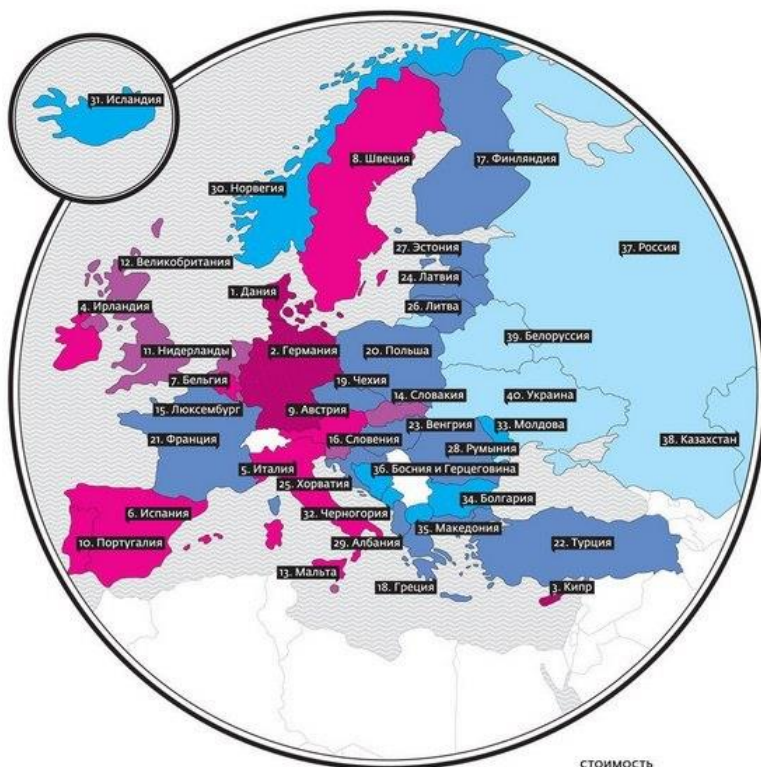
Поступление CO₂ в атмосферу по отраслям



Источник: IPCC 2007, рис. 2.1.

Стоимость энергопотребления

Рейтинг стран Европы по стоимости электроэнергии-2013



2,58 РУБ. ЗА КВТ Ч

составляет в среднем стоимость электроэнергии в России

СТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ, РУБ. ЗА КВТ Ч

- менее 3 руб.
- от 3 до 5 руб.
- от 5 до 7 руб.
- от 7 до 9 руб.
- от 9 до 11 руб.
- более 11 руб.

Источник: расчеты «РИА Рейтинг» по данным Евростата, статистических и регулирующих органов стран, не входящих в ЕС, ЦБ РФ, МВФ. Для стран зоны евро, Норвегии и Великобритании — данные на конец первого полугодия 2013 года, для Турции — на начало года, для остальных стран — по состоянию на начало ноября. Цены приводятся исходя из оценки «РИА Рейтинг» на основании средних или наиболее характерных для большинства населения установленных тарифов.

	Среднее	Стоимость электроэнергии, руб. за кВт ч	Изменение за 5 лет, %	Количество кВт ч на среднемесячный чистый заработок жителя (рубля)
1 Дания	6,72	13,18	43,2%	8954
2 Германия		12,82	13,9%	8999
3 Кипр		12,12	35,9%	7687
4 Ирландия		10,08	55,1%	н.д.
5 Италия		10,07	29,7%	9716
6 Испания		9,79	12,9%	7274
7 Бельгия		9,54	63,1%	10 109
8 Швеция		9,23	10,2%	13 257
9 Австрия		9,14	23,7%	10 794
10 Португалия		9,14	17,0%	4928
11 Нидерланды		8,59	40,4%	13 466
12 Великобритания		7,65	10,5%	15 899
13 Мальта		7,47	19,4%	7912
14 Словакия		7,46	71,2%	3721
15 Люксембург		7,31	19,5%	18 529
16 Словения		7,07	1,2%	5968
17 Финляндия		6,93	40,4%	15 464
18 Греция		6,86	29,0%	7993
19 Чехия		6,70	49,3%	5037
20 Польша		6,50	19,7%	3946
21 Франция		6,47	17,6%	14 882
22 Турция		6,46	21,4%	н.д.
23 Венгрия		6,14	47,3%	н.д.
24 Латвия		6,05	9,8%	3685
25 Хорватия		6,03	63,7%	3574
26 Литва		6,02	38,6%	н.д.
27 Эстония		5,93	59,3%	3285
28 Румыния		5,81	66,0%	5410
29 Албания		5,08	24,7%	2667
30 Норвегия		4,69	н.д.	н.д.
31 Исландия		4,62	н.д.	н.д.
32 Черногория		4,48	н.д.	н.д.
33 Молдова		4,24	57,4%	1705
34 Болгария		4,06	30,0%	3063
35 Македония		3,56	н.д.	н.д.
36 Босния и Герцеговина		3,53	н.д.	н.д.
37 Россия		2,58	81,1%	9031
38 Казахстан		2,21	55,6%	8806
39 Белоруссия		1,93	337,4%	6019
40 Украина		1,12	15,0%	8964

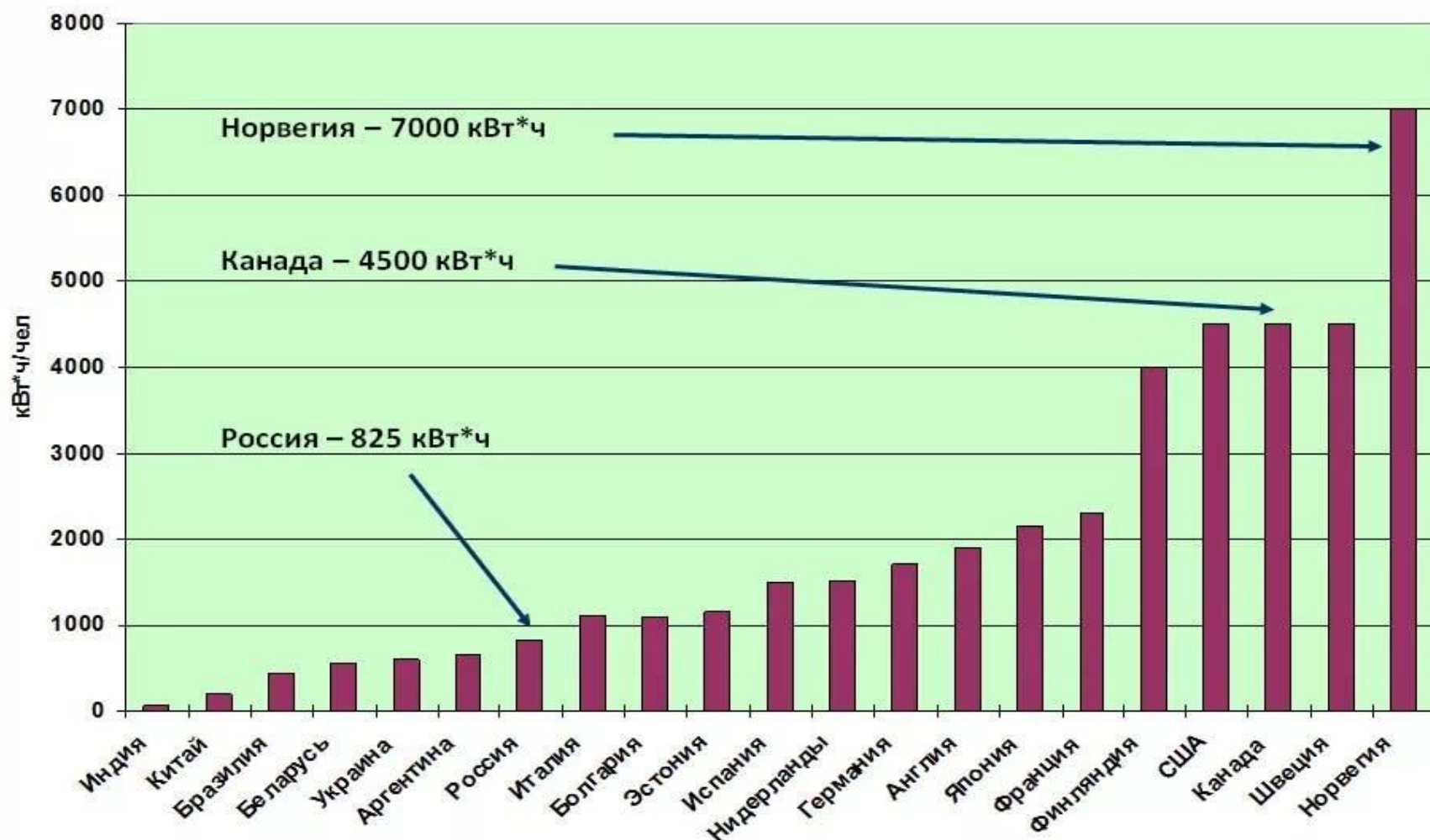
Производство и потребление энергии

Производство и потребление электроэнергии

Страна	Доля в мировом производстве, в %	Страна	Доля в мировом потреблении, в %
США	18,9	США	24,2
РФ	12,5	Китай	9,2
Китай	9,2	РФ	8,9
СА	5,8	Япония	5,5
Канада	4,4	Германия	4,0
Великобритания	2,7	Канада	3,3
Иран	2,6	Франция	2,7
Мексика	2,3	Великобритания	2,7
Индия	2,1	Индия	2,6
Венесуэла	2,1	Украина	2,2

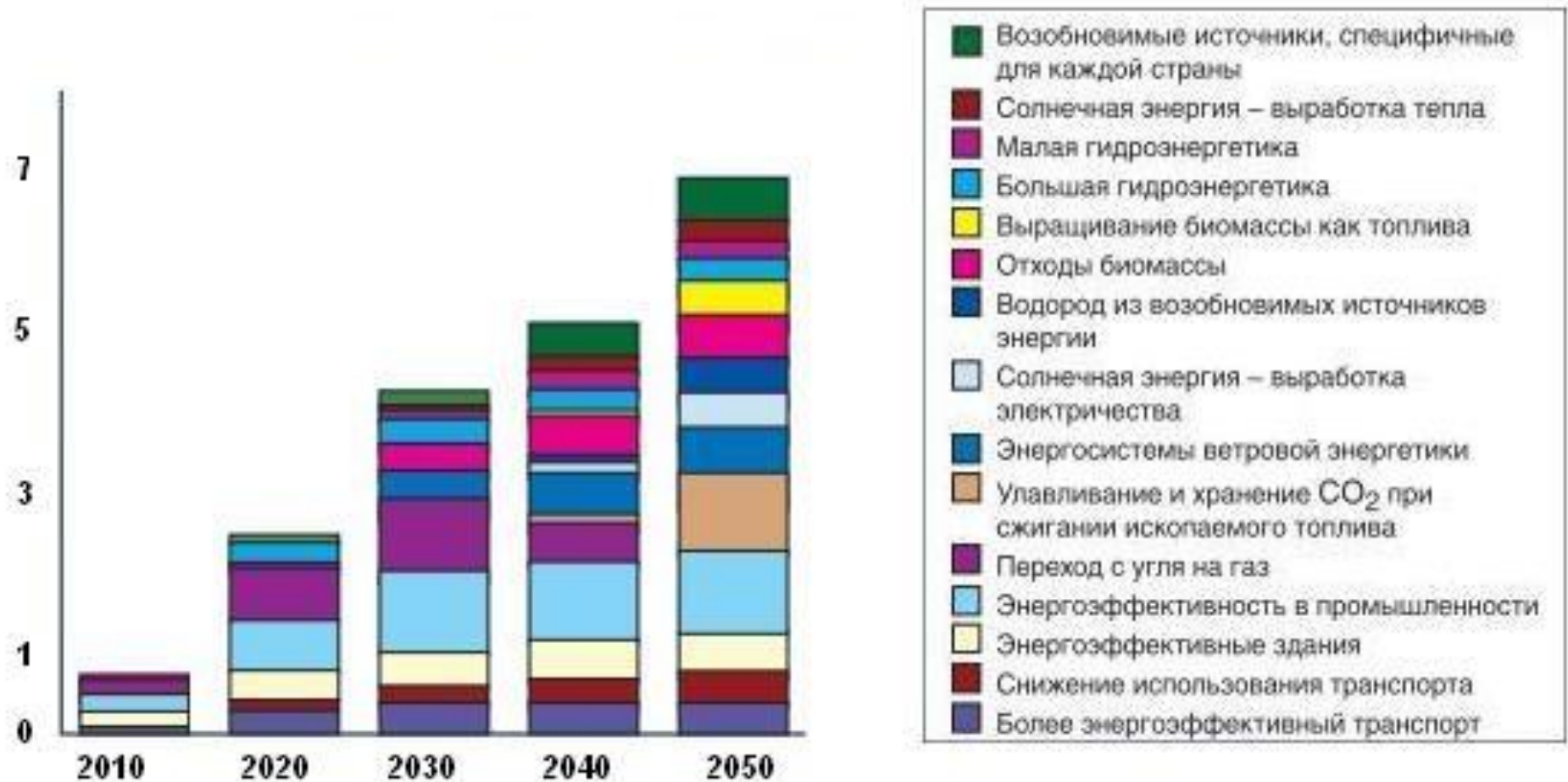
Удельное потребление электроэнергии

Удельное потребление электроэнергии населением,
кВт*ч/чел в год



Меры по снижению выбросов парниковых газов

Примерный набор мер для снижения выбросов парниковых газов

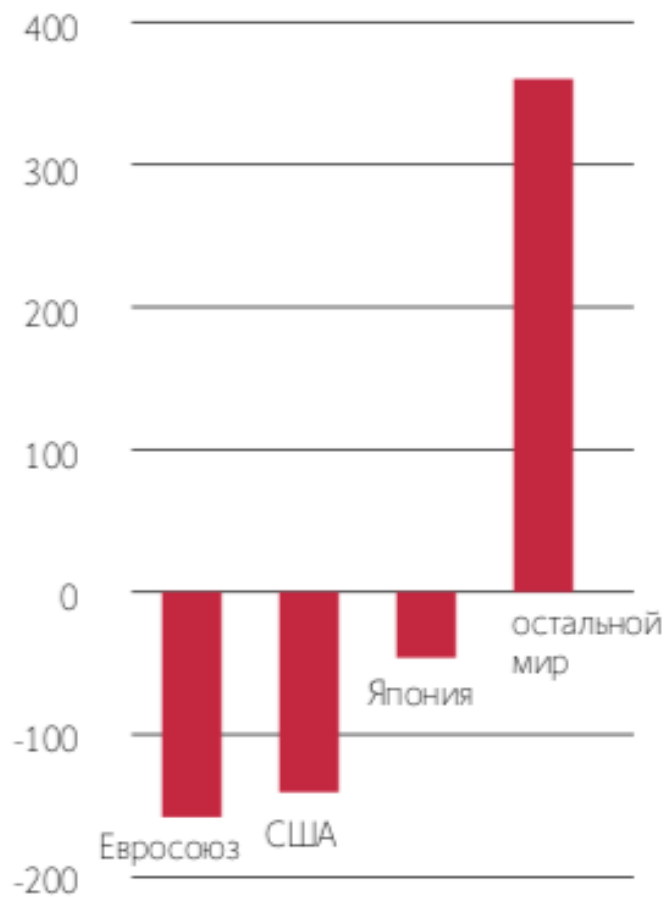


Источник: WWF Energy Task Force, 2006

Меры по снижению выбросов парниковых газов

Изменение выбросов CO₂ в мировой энергетике

в 2019 г. по сравнению с 2018 г., млн т



Развитые страны сокращают выбросы, несмотря на рост производства электроэнергии

производство электроэнергии, ТВт ч

выбросы CO₂, млн т

15 000

8000

7500

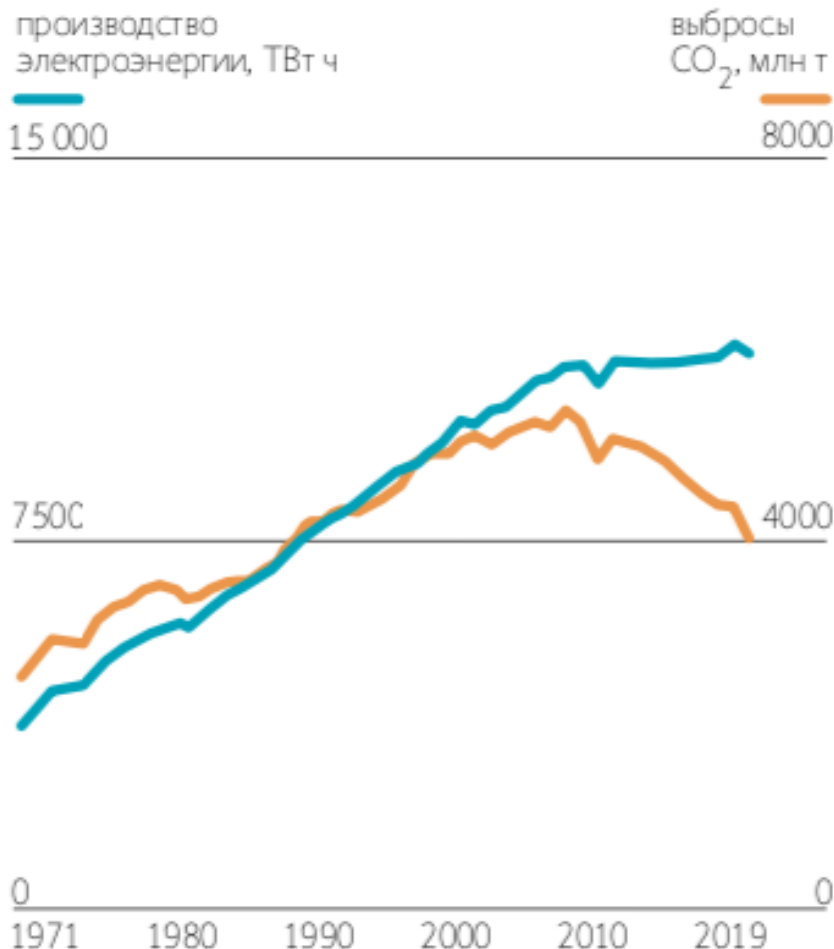
4000

0

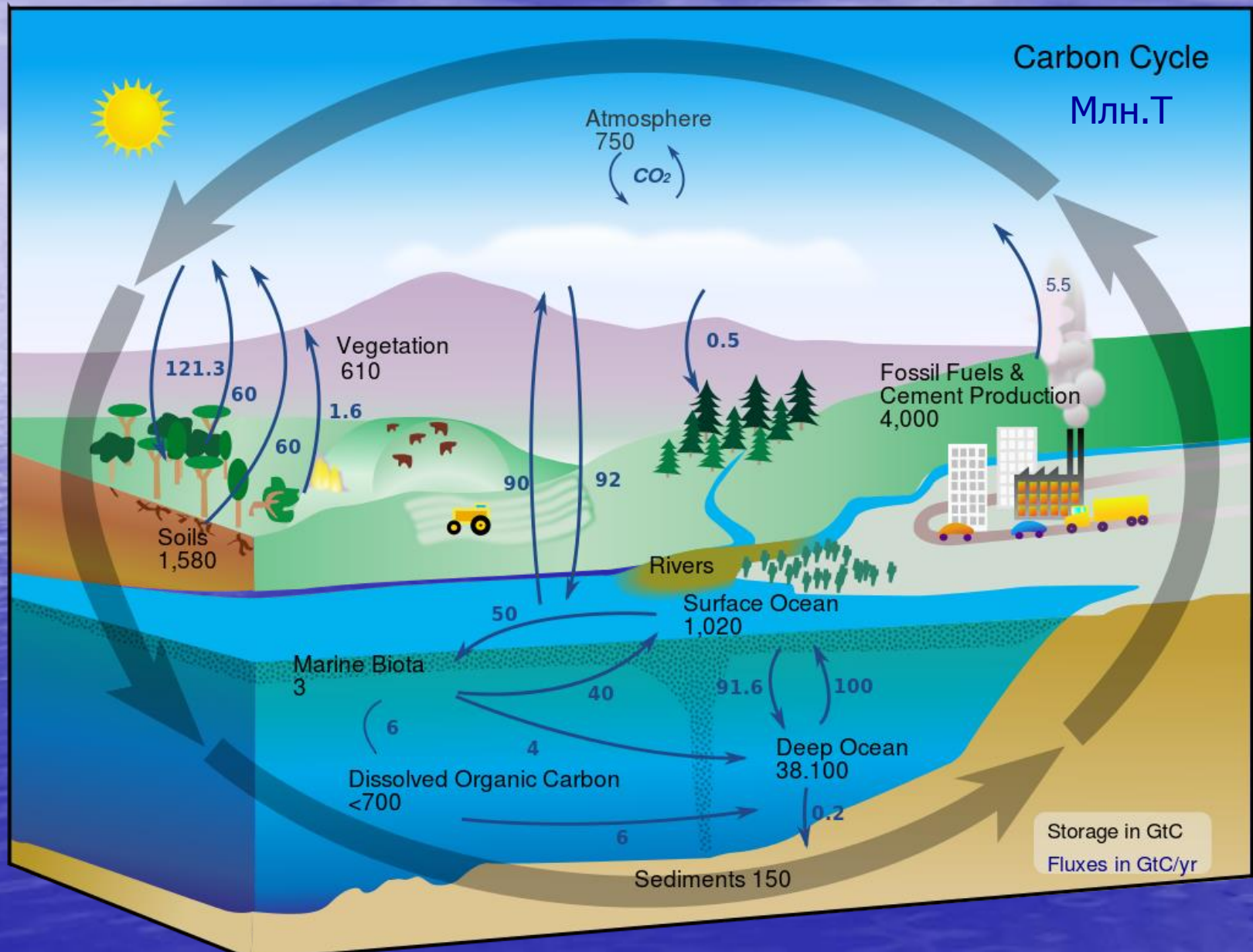
0

1971 1980 1990 2000 2010 2019

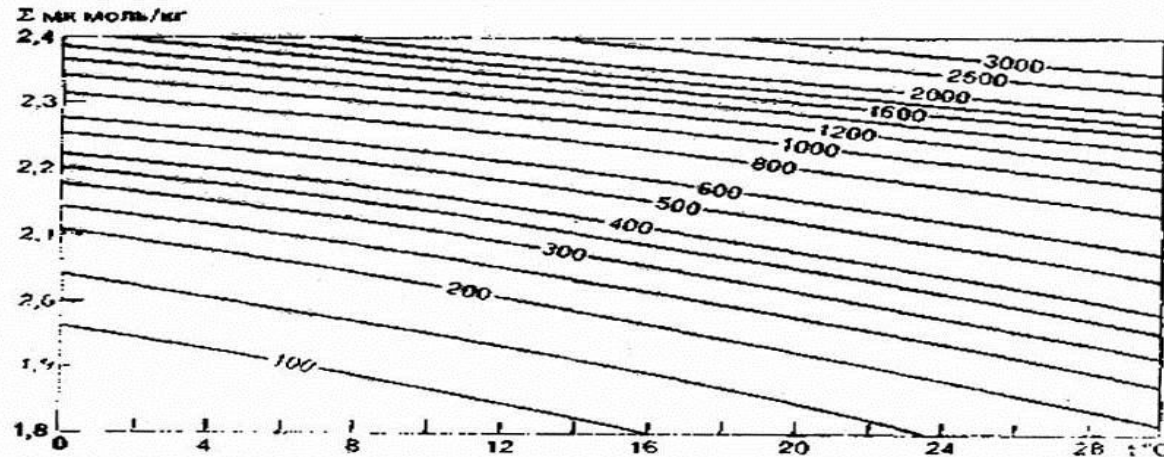
ИСТОЧНИК: МЕЖДУНАРОДНОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО



Кругооборот углерода на Земном шаре



Фактор растворимости CO_2 в морской воде в обмене между атмосферой и океаном



Зависимость концентрации CO_2 в морской воде (млн^{-1}) от концентрации растворенного неорганического углерода Σ и температуры t .

Обмен CO_2 между газовой фазой и раствором зависит от буферного фактора ξ

$$\xi = (\Delta P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}_2}) / (\Delta \Sigma / \Sigma)$$

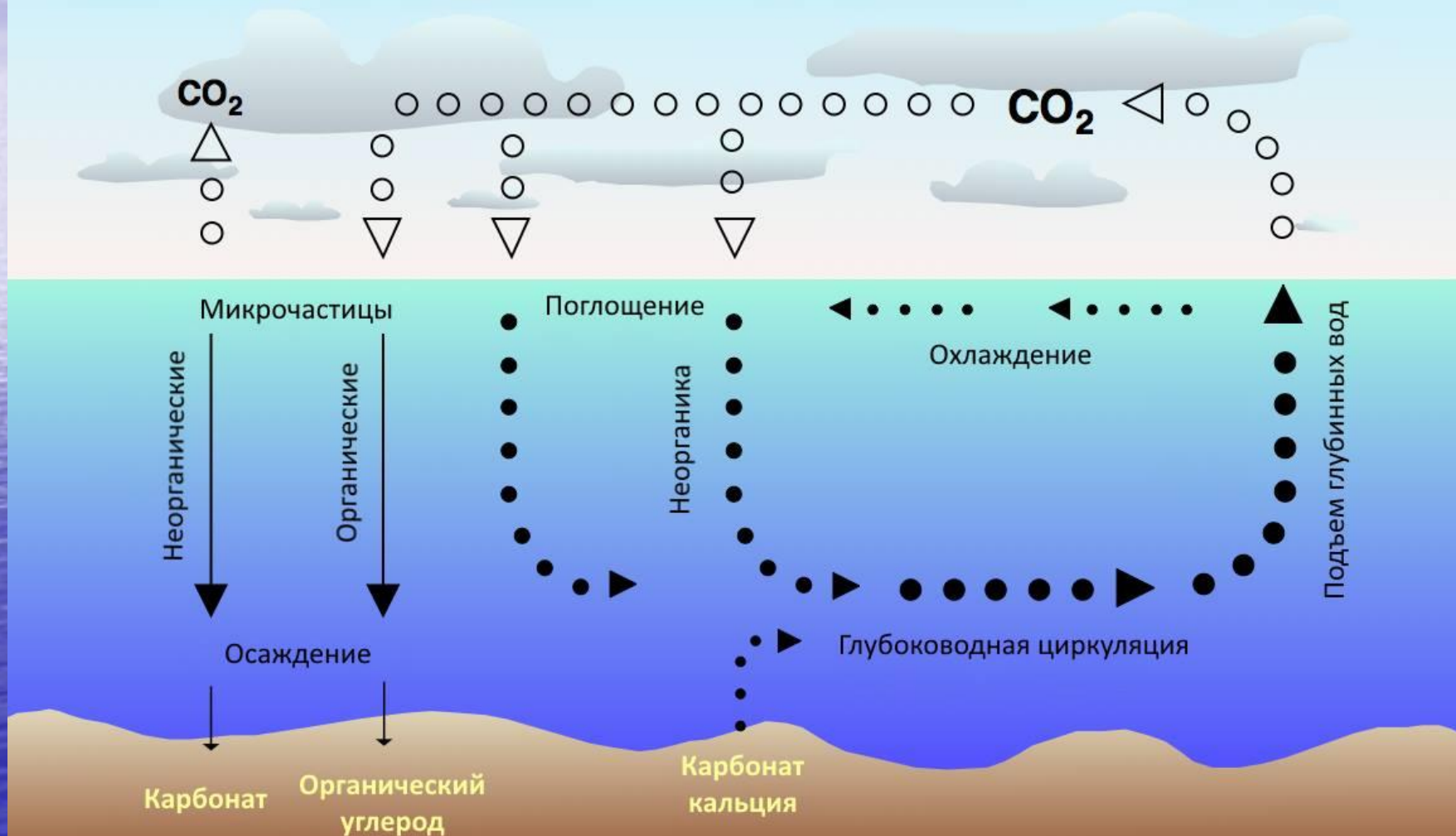
$\xi \sim 10$ увеличивается с ростом значений Σ . $\Rightarrow P_{\text{CO}_2}$ чувствительно к малым изменениям Σ в воде.

Изменение концентрации CO_2 в атмосфере примерно на 25% $\Rightarrow$ изменение содержания суммарного растворенного неорганического углерода в поверхностных водах только на 2 – 2.5 %.

$T \downarrow \quad \xi \uparrow \quad \Rightarrow \quad \text{CO}_2$ из атм в океан
 $P_{\text{CO}_2} \sim \text{const}$
 экватор - полюс
 в высоких широтах

CO₂ в атмосфере и океане

Биологические и физические насосы углекислого газа



CO₂ в атмосфере и океане

- Атмосферный воздух в среднем содержит 0,03 об % углекислоты. Общее содержание двуокиси углерода **в атмосфере** оценивается в **0,0233 x 10²⁰г.**
- **В океане** двуокись углерода присутствует в виде H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻, органического вещества; общее ее содержание оценивается **в 1,4 x 10²⁰г,** что примерно **в 60 раз** превосходит ее количество в атмосфере.
- Кроме того, в растворенном состоянии также находится большое количество углекислоты: средняя общая концентрация CO₂ в морской воде составляет 2,3 миллимоля/л.

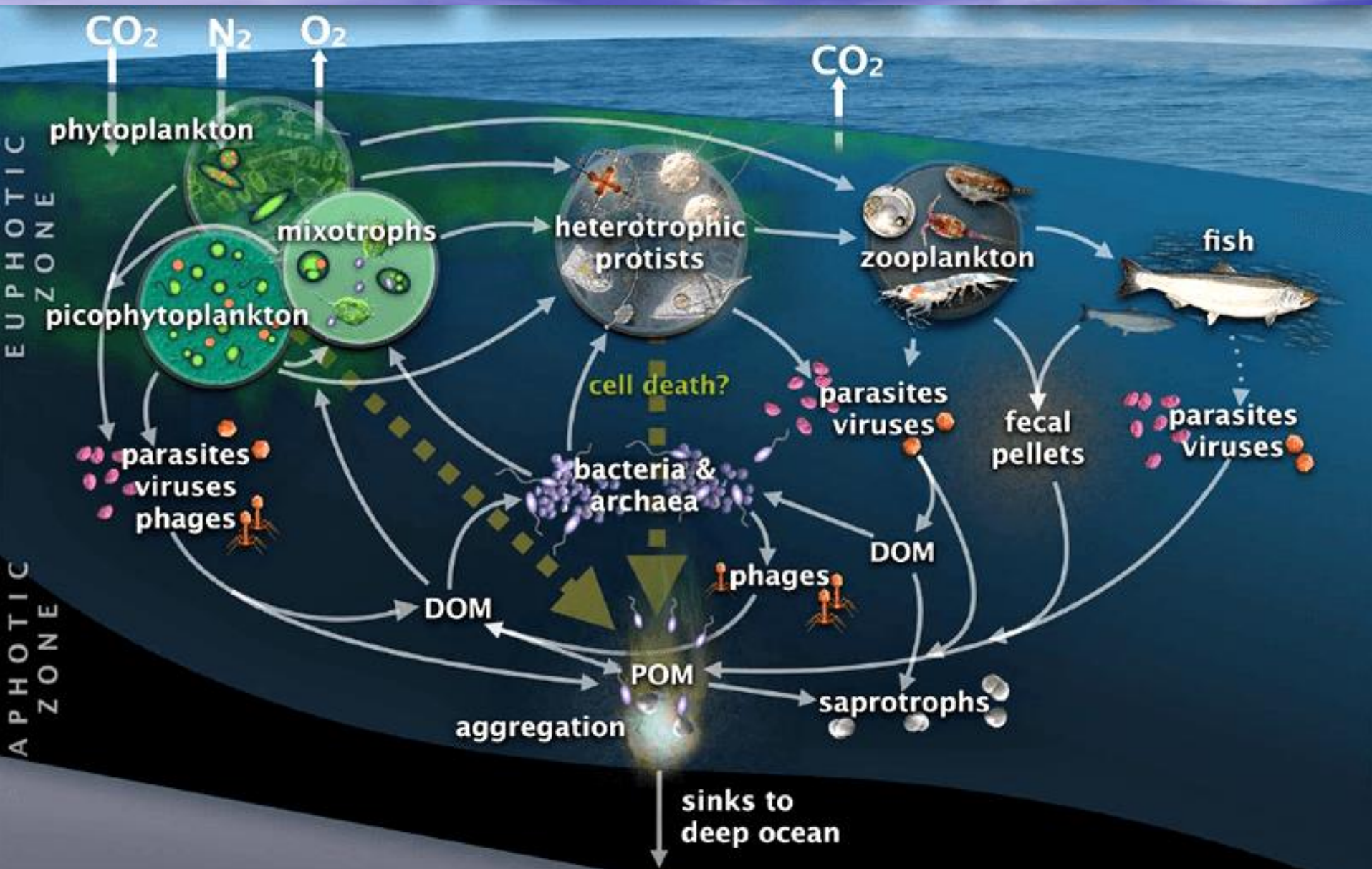
CO₂ в живых организмах

- По расчетным данным наибольшее количество углекислоты производится живыми организмами. Количество углерода, содержащегося в живых организмах, будучи выражено через CO₂, составляет около **0,145 x 10²⁰г**, что **в 6 или 7 раз** превышает содержание CO₂ в атмосфере.
- Как указывал В.И. Вернадский, организмы являются важным звеном в геохимическом цикле углерода.

Баланс CO_2 между атмосферой и морской водой

- Исходя из наблюдений за поведением C^{14} в атмосфере и океане Ревель и Зюсс (1957) оценивают время пребывания конкретной молекулы углекислоты в атмосфере 14-30 лет.
- Концентрация двуокиси углерода в воздухе непосредственно над поверхностью моря довольно постоянна, в среднем около 317,4 ppm. Океан абсорбирует углекислоту всей площадью своей поверхности. По данным Такахаши, средняя концентрация углекислоты в атмосферном воздухе 320,8 ppm.

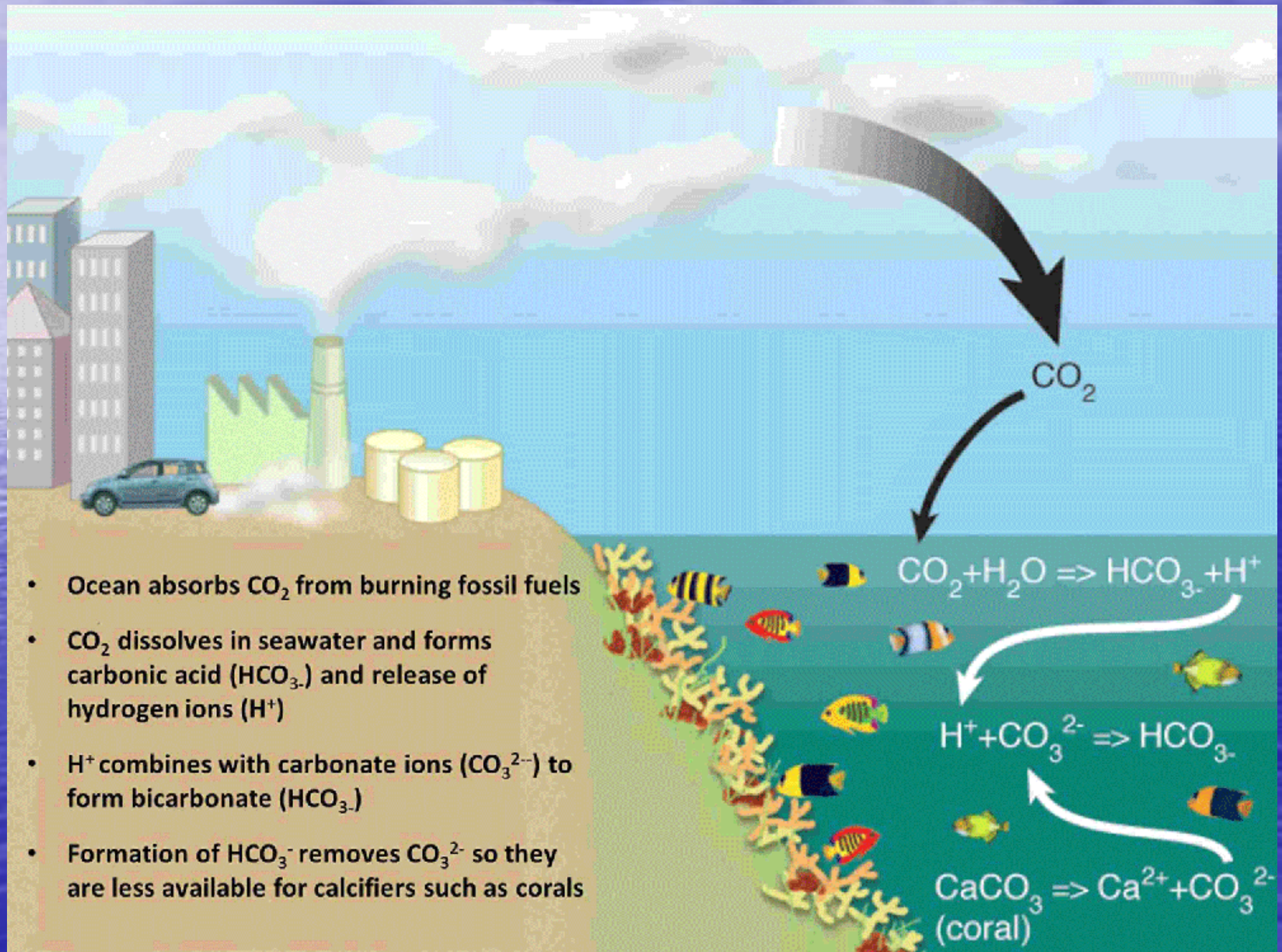
CO₂ в атмосфере и океане



Влияние выбросов CO₂ на морскую фауну

- Выбросы двуокиси углерода в результате деятельности человека приводят к окислению мирового океана и угрожают массовым уничтожением морской флоры и фауны.
По данным исследователей, со времен промышленной революции выбросы углекислого газа привели к 30% повышению кислотности океанской воды. Такой кислотности в океане не было по меньшей мере 500 тысяч лет.

CO₂ в атмосфере и океане



Меры по снижению выбросов парниковых газов

Как сообщает Phys.org, в центре внимания специалистов оказался вопрос о том, насколько чувствителен климат к удвоению концентрации парниковых газов по сравнению с доиндустриальным уровнем, составлявшем 280 частей на миллион. Более тридцати лет считалось, что, если концентрация вырастет до 560 частей на миллион, климат потеплеет на $3^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$. В реальности удвоение уровня парниковых газов приведет к потеплению в среднем на $4-6^{\circ}\text{C}$.

Меры по снижению выбросов парниковых газов

Страной, где выбросы CO₂ уменьшились сильнее всего в последние годы, стали США, которые президент Дональд Трамп вывел из Парижского соглашения по климату, – на 140 млн т, или на 2,9%. Теперь они составляют 4,8 Гт, что почти на 1 Гт меньше, чем на пике в 2000 г. Это стало возможным благодаря сокращению использования угля в электрогенерации на 15% в прошлом году. Если в 2008 г. цена природного газа в США почти достигала \$14 за 1 млн британских тепловых единиц (BTU), то с 2012 г. не превышала \$4 за исключением нескольких краткосрочных периодов. В 2018 году газ стоил \$2–3, а в 2019 цена упала ниже \$2 за 1 млн BTU, в том числе из-за сокращения спроса на электроэнергию в результате прохладного лета и мягкой зимы.

Меры по снижению выбросов парниковых газов

В Евросоюзе выбросы снизились на 160 млн т, или на 5%, до 2,9 Гт. Впервые в регионе доля газа в электрогенерации превысила долю угля, отмечает МЭА. А ветряная энергетика, уже ставшая прибыльным сектором даже без госсубсидий, почти догнала угольную отрасль. В Японии выбросы сократились на 45 млн т, или на 4,3%, до 1,03 Гт, потому что страна возобновляет эксплуатацию атомных реакторов, которые прекратили работу после аварии на АЭС в Фукусиме в 2011 г.

Главное в снижении выбросов – повышение энергоэффективности при потреблении, заявил гендиректор Total Патрик Пуянне. Необходимо инвестировать в технологии, которые позволят достичь «углеродной нейтральности», когда выбросы парниковых газов в целом не увеличиваются, призвал он.

Меры по снижению содержания CO_2 в атмосфере

Большинство методов удаления углекислого газа из потока газа требуют более высоких концентраций, таких как те, которые присутствуют в дымовых выбросах электростанций на основе ископаемого топлива. Было разработано несколько вариантов, которые могут работать с низкими концентрациями, существующими в воздухе.

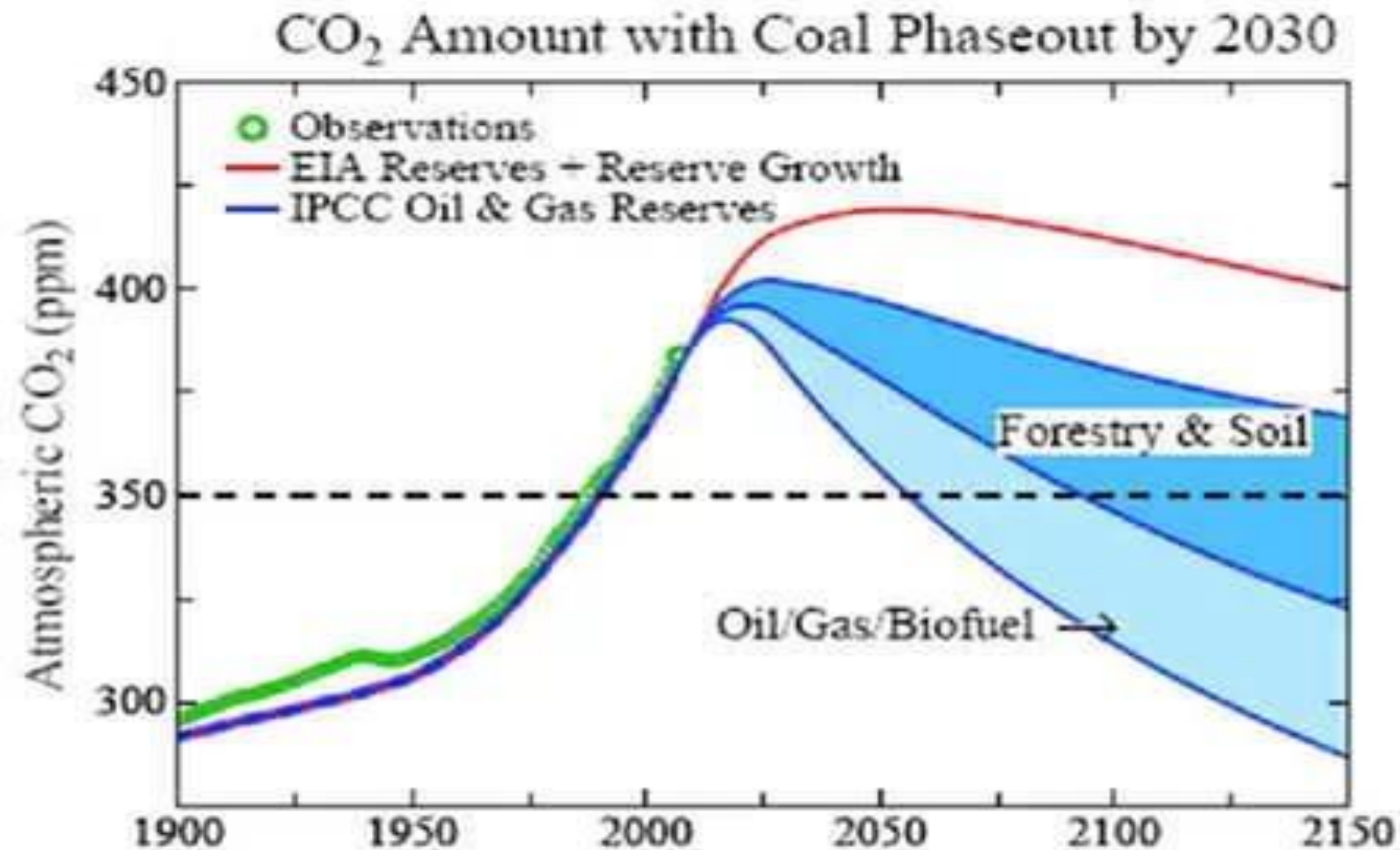
Новый метод, разработанный в MIT, основан на пропускании воздуха через пакет заряженных электрохимических пластин. Само устройство представляет собой большую батарею, которая поглощает углекислый газ из воздуха (или другого газового потока), проходящего через ее электроды, когда она заряжается (заполняется CO_2), а затем выпускает CO_2 в процессе разрядки.

Меры по снижению содержания CO₂ в атмосфере

Большинство методов удаления углекислого газа из потока газа требуют более высоких концентраций, таких как те, которые присутствуют в дымовых выбросах электростанций на основе ископаемого топлива. Было разработано несколько вариантов, которые могут работать с низкими концентрациями, существующими в воздухе.

Новый метод, разработанный в MIT, основан на пропускании воздуха через пакет заряженных электрохимических пластин. Само устройство представляет собой большую батарею, которая поглощает углекислый газ из воздуха (или другого газового потока), проходящего через ее электроды, когда она заряжается (заполняется CO₂), а затем выпускает CO₂ в процессе разрядки.

Прогноз по концентрации CO₂



Сжигаем углерода масштаба
 $5 \cdot 10^{12}$ кг/год

Это дает энергосвечение
 $2 \cdot 10^{20}$ Дж/год
или среднюю мощность
 $6 \cdot 10^{12}$ Вт

От Солнца поступает $7 \cdot 10^{16}$ Вт

Мировой океан как аккумулятор энергии

$$\rho_0 = 1 \text{ кг} / \text{см}^3$$

$$C_0 = 4.18 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{K}^0$$

$$R_3 = 6 \cdot 10^3 \text{ км} = 6 \cdot 10^8 \text{ см}$$

$$h \approx 100 \text{ м} = 10^4 \text{ см}$$

$$S_{ок} = 0.7 S_3 = 0.7 \cdot 4\pi R_3^2$$

$$C_{ок} = S_{ок} \cdot h \rho_0 C_0 \cong 1.7 \cdot 10^{23} \text{ Дж} / \text{K}^0$$

**Теплоемкость
океана**

$$P_C = \pi R_3^2 W_C \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$$

$$\Delta T_K = 3 \text{ K}^0$$

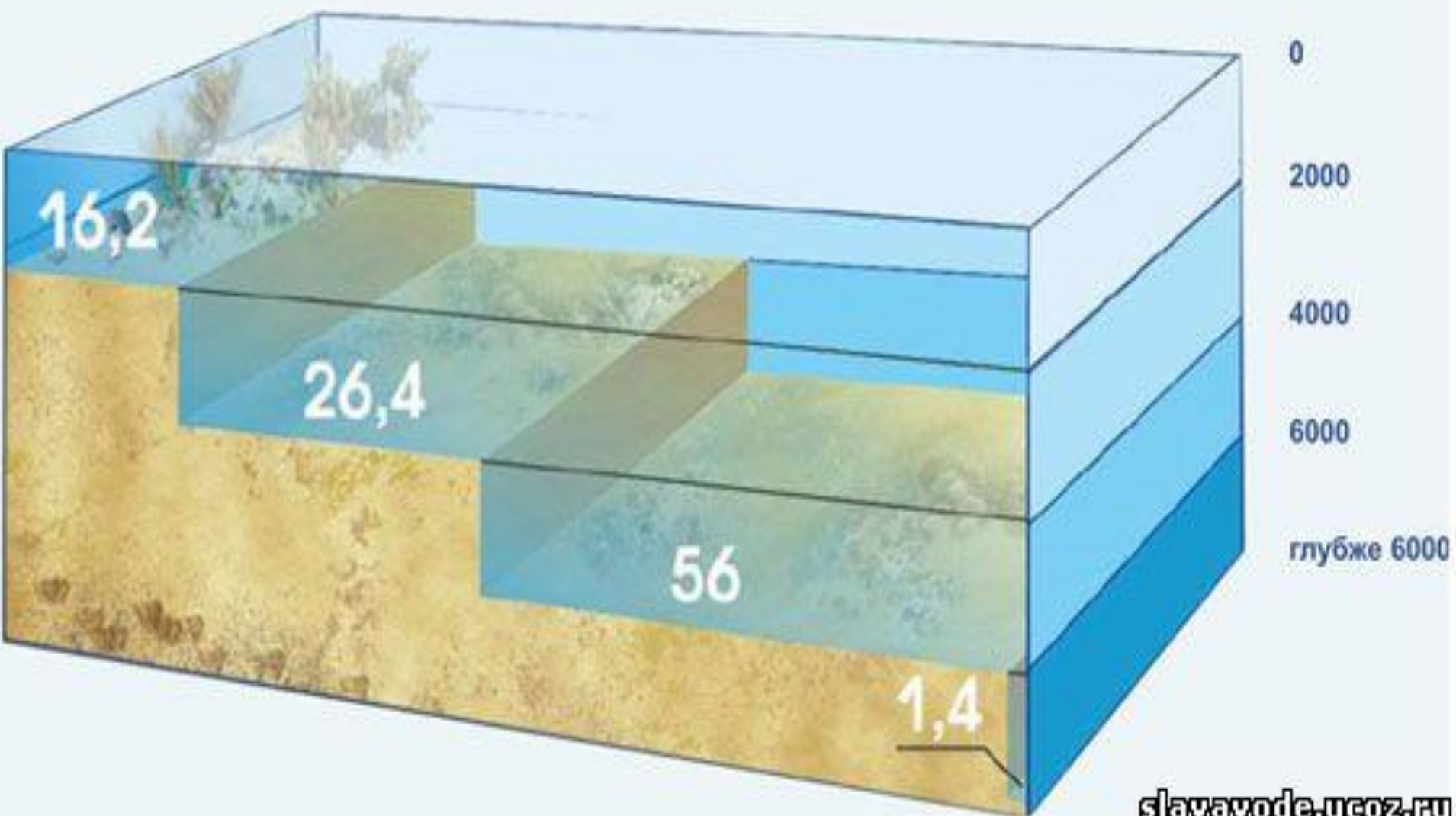
$$\Delta t = \frac{C_{ок} \Delta T_K}{P_C} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 1 \text{ месяц}$$

**Мощность в потоке
солнечного
излучения**

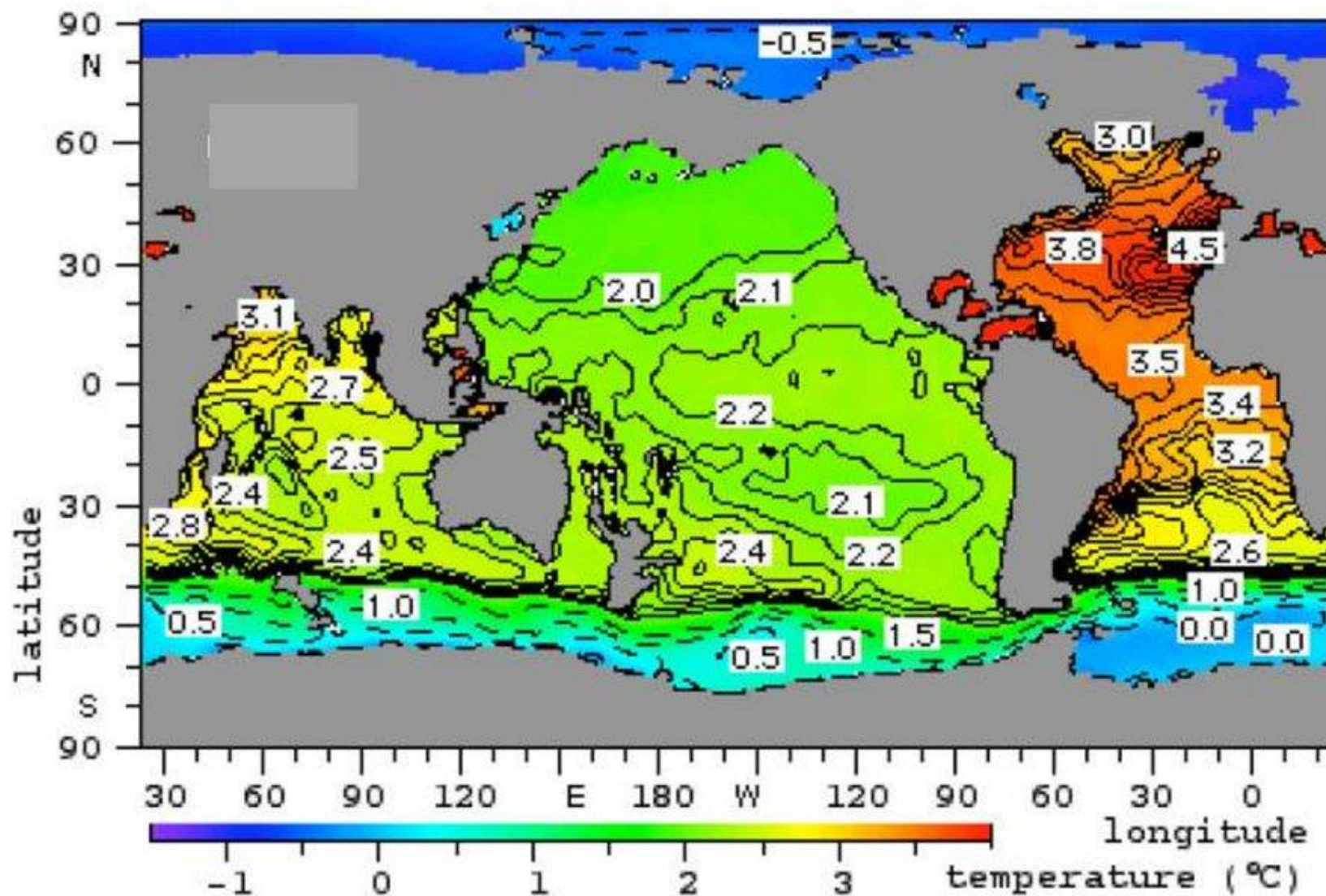
**Время изменения
температуры океана**

Объем вод океана на заданной глубине

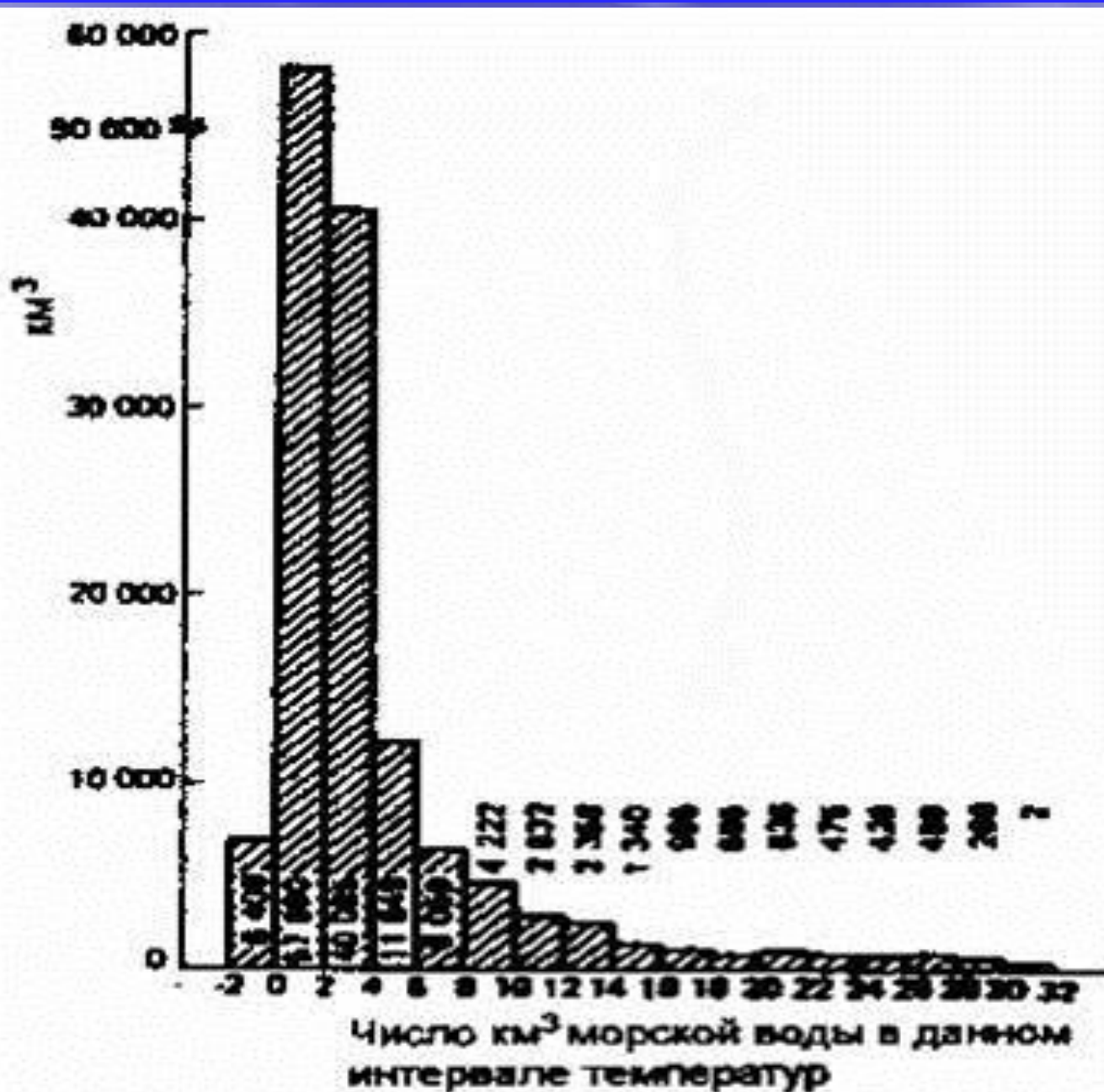
Распределение поверхности дна Мирового океана по высотным уровням (в %)



2000 м в Мировом океане



Объем вод океана при данной температуре



Температура в глубинах океана
средняя $T_{ок} \sim 3.5^{\circ}\text{C}$

Температура суши на поверхности средняя
 $T_{суш} \sim 15^{\circ}\text{C}$

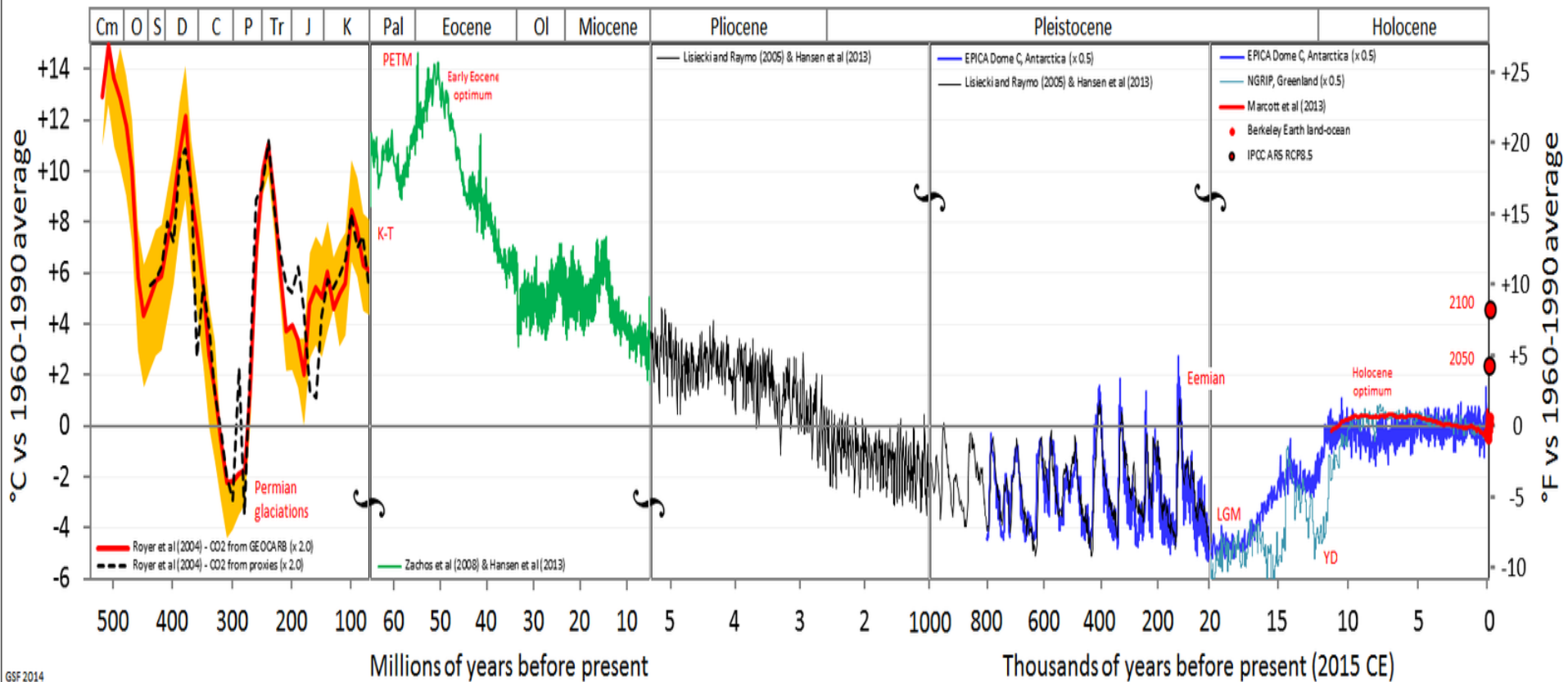
Запас холода в океане

$$Q \sim m_{ок} C_o (T_{ок} - T_{суш}) \sim -6 * 10^{25} \text{ Дж !}$$

**15 лет солнечного
потока**

Изменения среднегодовой температуры на Земле

Temperature of Planet Earth

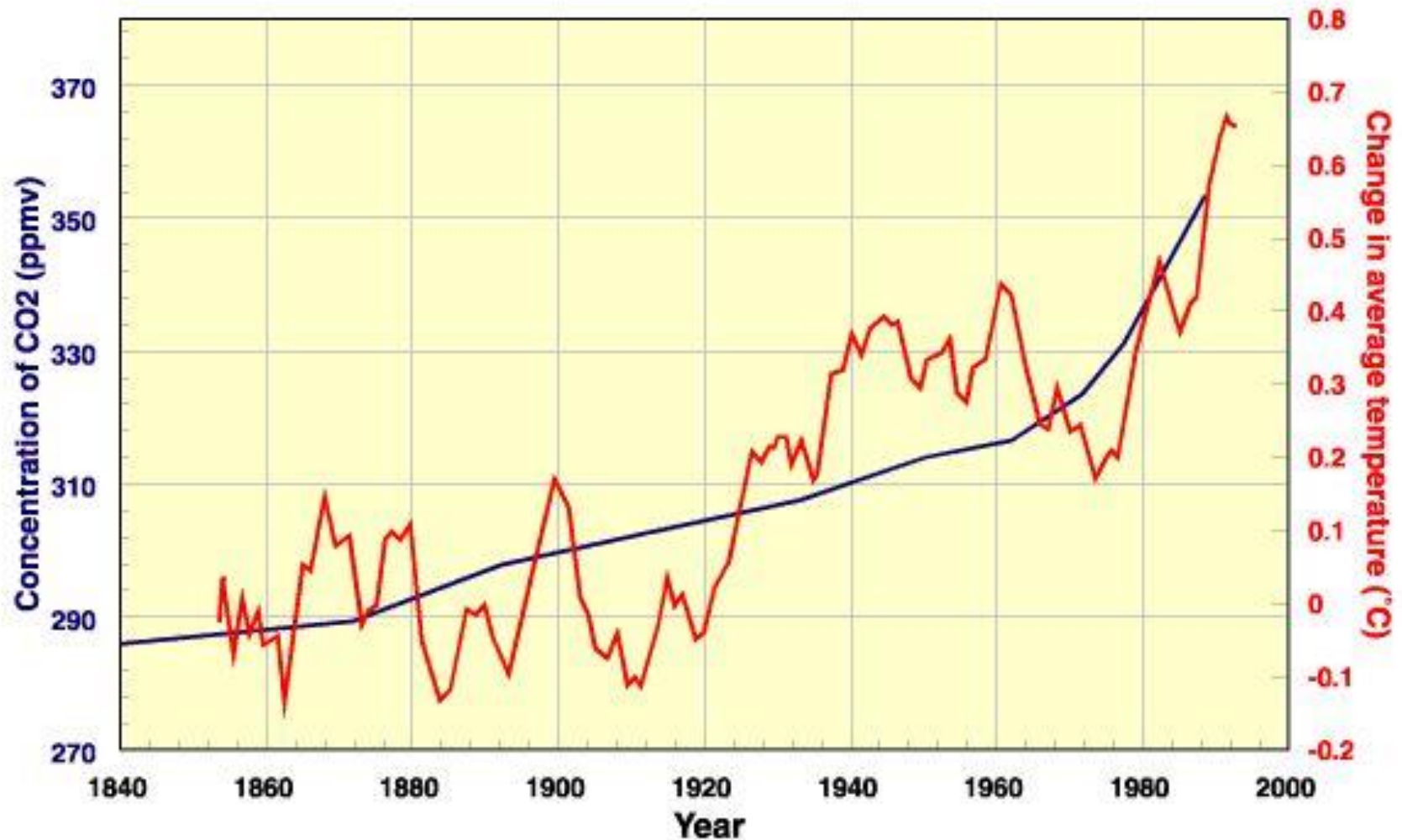


Изменения концентрации углекислоты в атмосфере Земли

Рис. 1.4.3. Содержание углекислого газа в атмосфере за последние 400 тыс. лет.



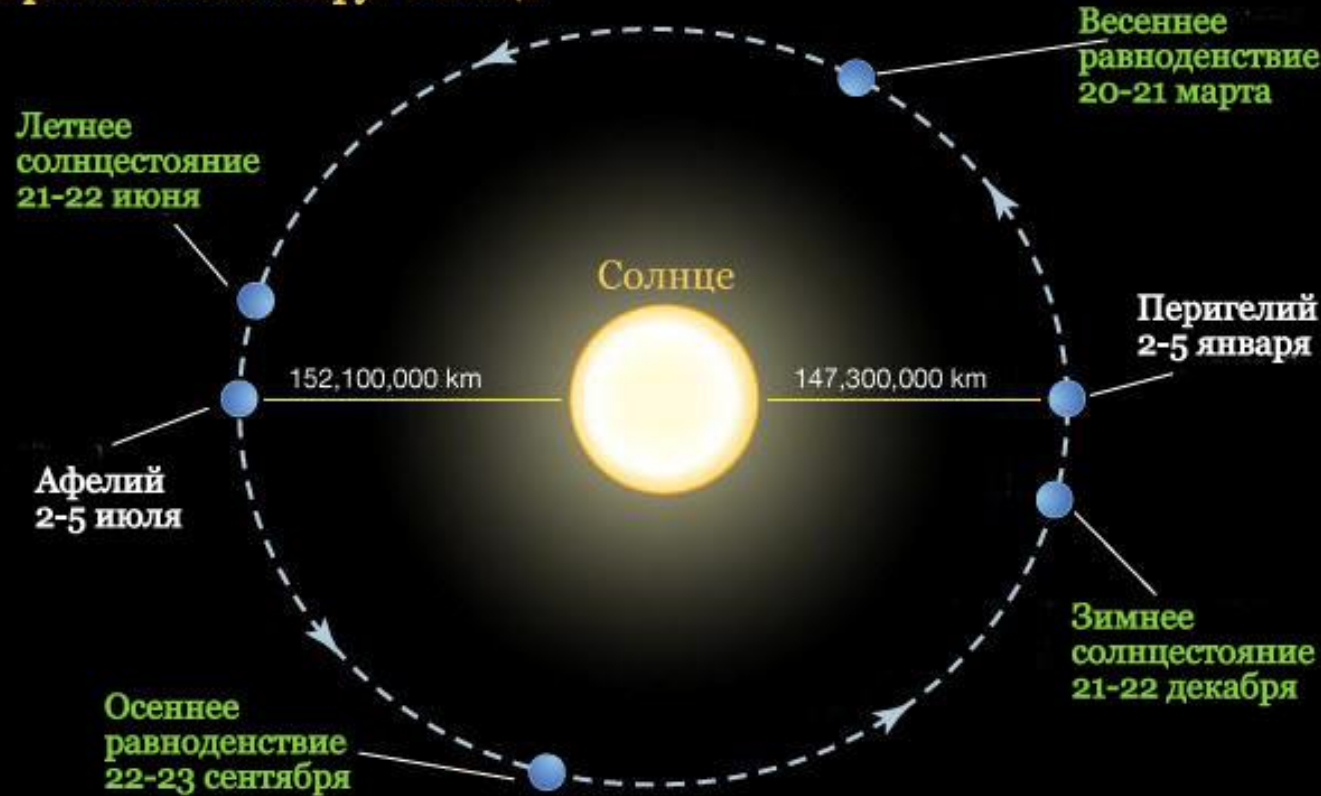
Изменения концентрации углекислоты и среднегодовой температуры на Земле



Глобальные астрономические явления, влияющие на температуру Земли

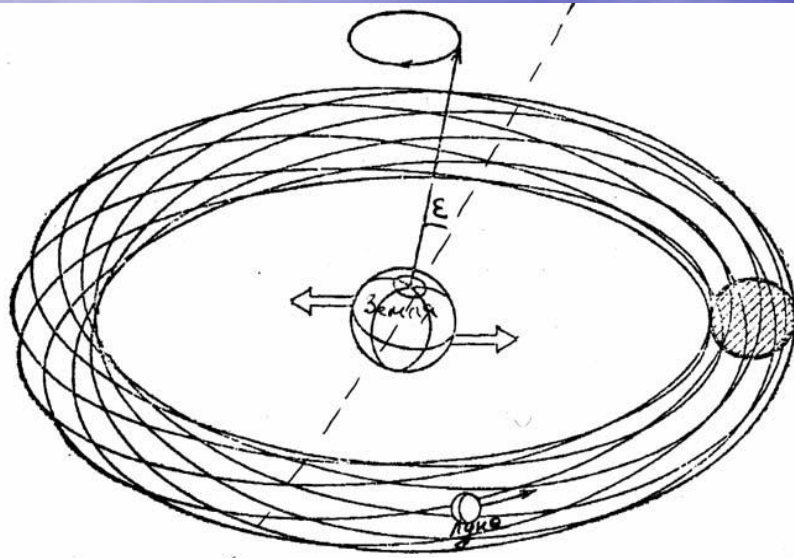
Колебания эксцентриситета земной орбиты. Максимальное же его значение $e_{\max}=0,0658$ за 100 тыс. лет. Расчеты показывают, что относительное изменение среднегодового количества тепла, получаемого Землей от Солнца, из-за колебаний эксцентриситета составляет всего около 0,2 %. Сама орбита поворачивается вокруг Солнца с периодом $T \sim 10$ тыс. лет.

Орбита Земли вокруг Солнца



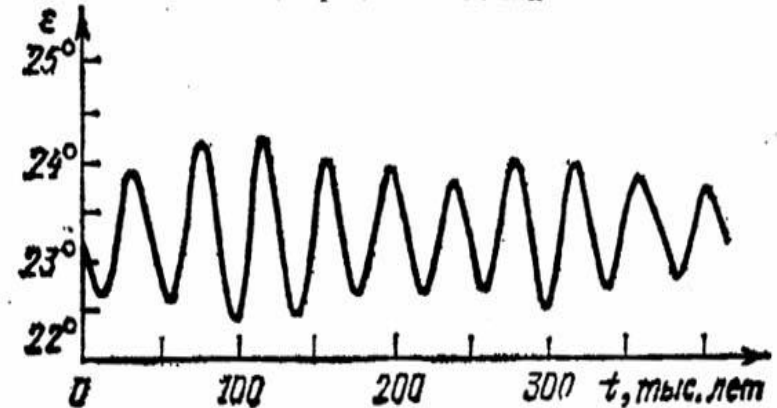
Быстрые вариации теплового режима планеты обусловлены циклами солнечной активности, периодичность которых составляет 11, 22 и около 100 лет

Изменения мощности, в поступающем от Солнца потоке излучения

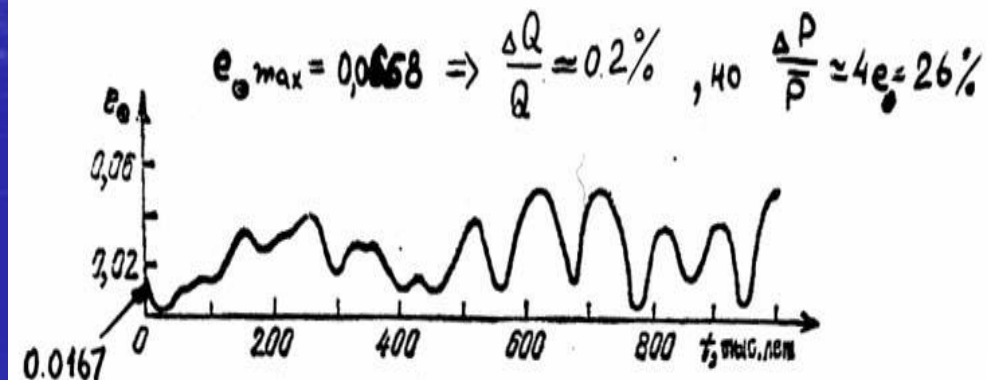


Тор возможных лунных орбит и силы, вызывающие прецессию вращения Земли

Цикл колебаний наклона оси вращения Земли составляет 26 тыс. лет.

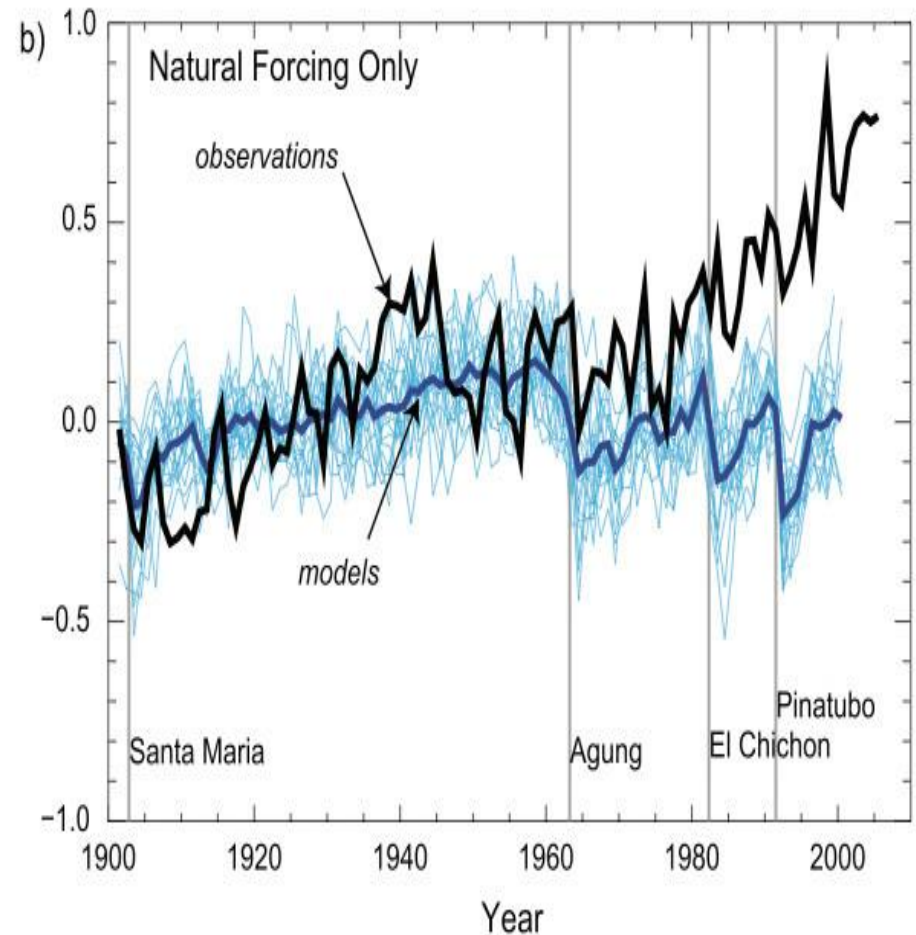
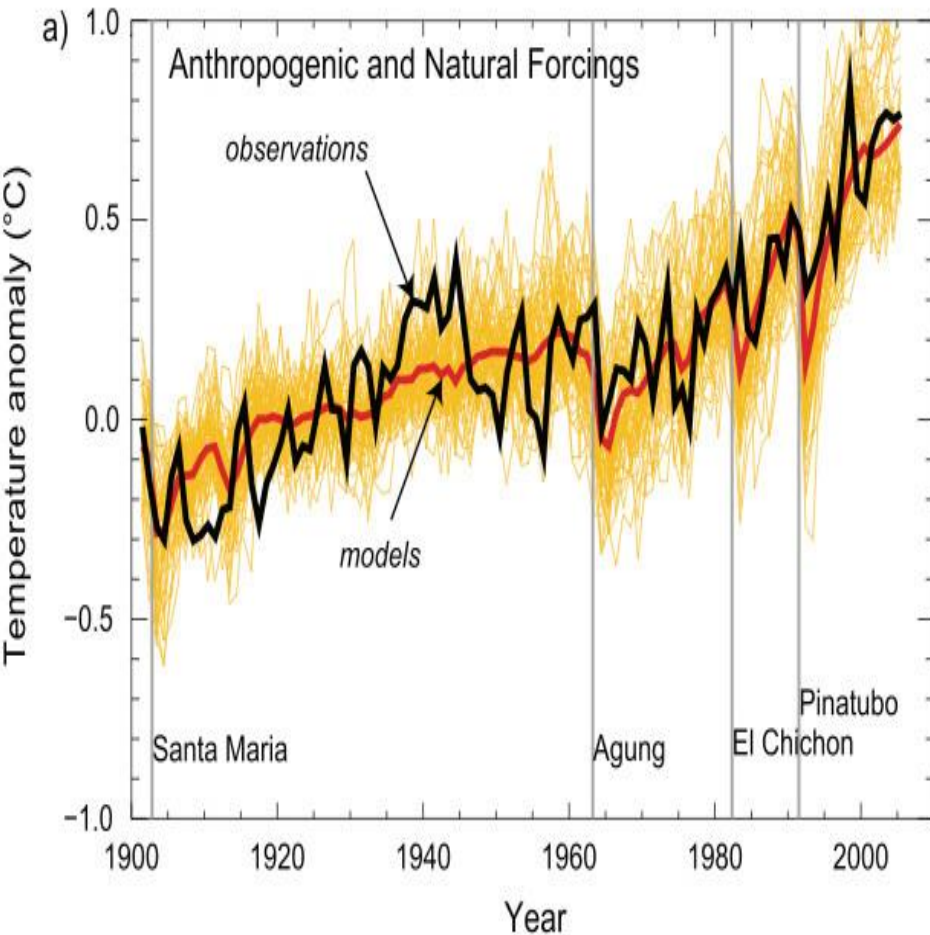


Изменение угла наклона земной оси на ближайшие 400 тыс. лет



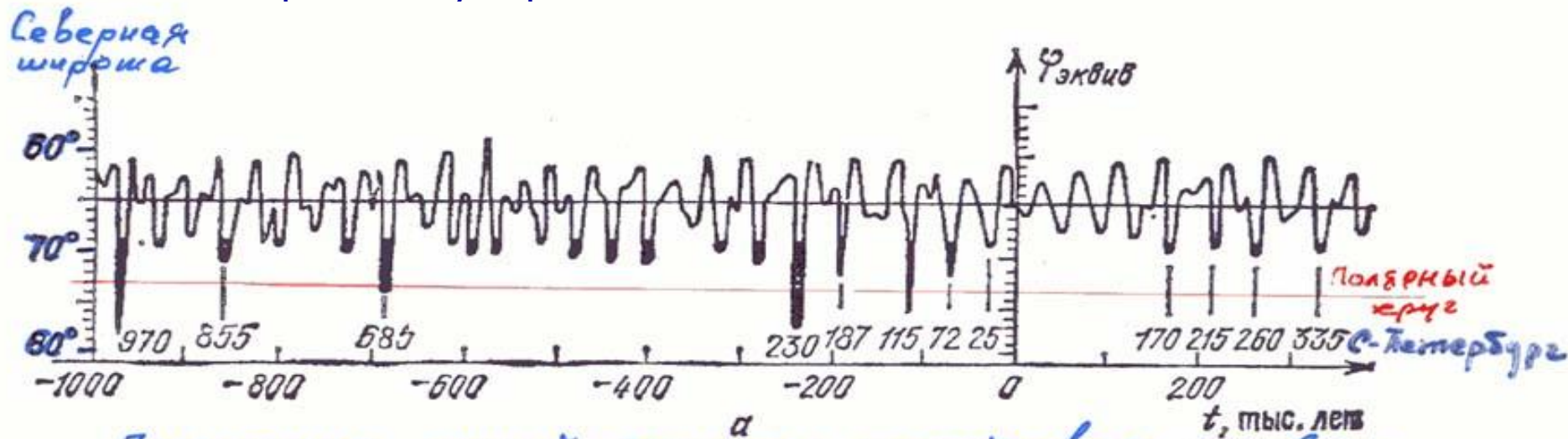
Изменение эксцентриситета земной орбиты в ближайший миллион лет

Моделирование процессов, влияющих на температуру Земли



Изменение эквивалентной широты Миланковича

Изменение положения южной границы устойчивого ледового покрытия в северном полушарии



В 2000 году NASA опубликовало информацию о Теории климата Миланковича. Суть её в следующем. Когда в летнее время для Северного полушария Земля оказывается в афелии, то лето долгое и холодное, а зима бывает относительно теплой, но короткой. Такая ситуация продолжается несколько тысяч лет подряд, и Земля значительно остывает. Ледники в Северном полушарии начинают сползать к югу. И наоборот, когда северное полушарие попадает в перигелий. То, что в настоящее время утверждается, будто причиной глобального потепления является деятельность человека, вызвано политическими причинами, а вовсе не научным обоснованием.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ