

*Девятнадцатая международная конференция*  
**«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»**

**Институт космических исследований РАН,  
15 ноября 2021 г.**

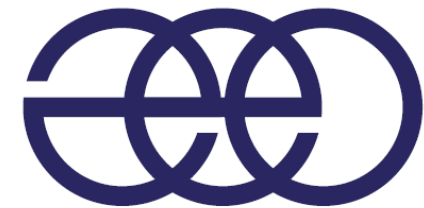
**ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ И ГЛОБАЛЬНЫЙ КЛИМАТ**

***С. М. Семенов,  
А.А. Гладильщикова, В.В. Кузовкин***

**Институт глобального климата и экологии  
имени академика Ю.А. Израэля**

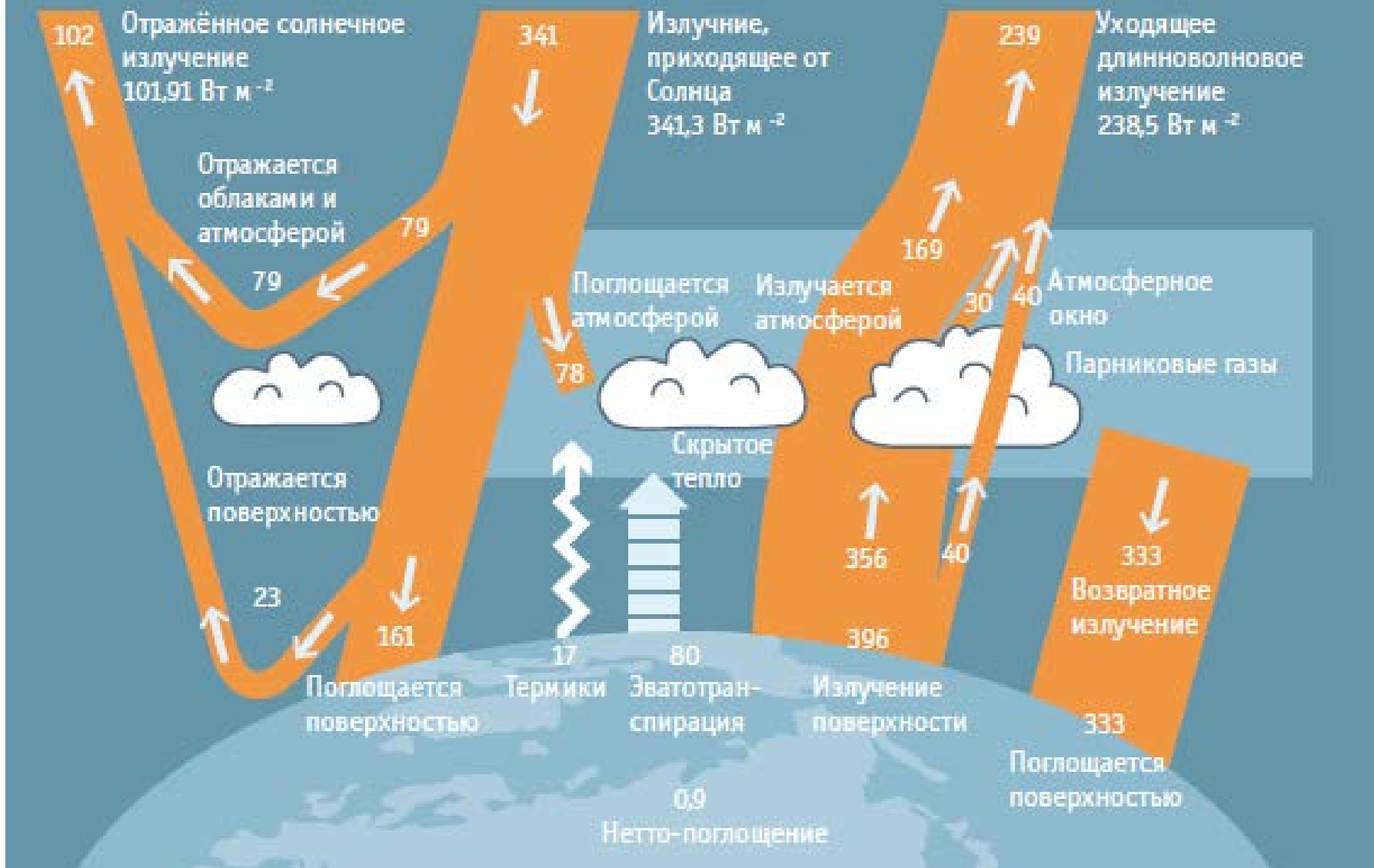


**ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ  
Российской академии наук**



**основан в 1918 году**

# Глобальные потоки энергии, Вт м<sup>-2</sup>



Современный энергетический бюджет Земли, Вт/м<sup>-2</sup> (Trenberth et al., 2009); на стрелках, представляющих потоки, указаны округлённые оценки

**Парниковый эффект** как явление в климатической системе Земли:

*радиационный эффект наличия в атмосфере парниковых веществ, выражающийся, при прочих равных условиях, в повышении температуры в приповерхностном слое по сравнению с ситуацией их отсутствия в атмосфере.*

**Характеристическое свойство парникового вещества:** оно в гораздо большей степени поглощает длинноволновое, земное излучение, чем коротковолновое излучение Солнца.

**Такими парниковым веществами являются парниковые газы (водяной пар, углекислый газ, метан, закись азота и др.) и вода в форме облаков.**

Газ	Эмиссия антропогенная в атмосферу	Эмиссия естественная в атмосферу	Сток из атмосферы	Расчетное накопление в атмосфере	Фактическое накопление в атмосфере
CO <sub>2</sub>	6.3 Гт (C)/год	150 Гт (C)/год	153 Гт (C)/год	3.3 Гт (C)/год	3.4 Гт (C)/год (1.6 ppm/год)
CH <sub>4</sub>	450 Мт (CH <sub>4</sub> )/год	160 Мт (CH <sub>4</sub> )/год	580 Мт (CH <sub>4</sub> )/год	30 Мт (CH <sub>4</sub> )/год	20 Мт (CH <sub>4</sub> )/год (7 ppb/год)
N <sub>2</sub> O	8.1 Мт (N)/год	9.6 Мт (N)/год	12.3 Мт (N)/год	5.4 Мт(N)/год	4 Мт(N)/год (0.8 ppb/год)

**Глобальные потоки CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O в 1980-1998 гг.**

2.12 Гт(C-CO<sub>2</sub>)/ppm(CO<sub>2</sub>) ; 2.8 Мт(CH<sub>4</sub>)/ppb(CH<sub>4</sub>) ; 4.96 Мт(N-NO<sub>2</sub>)/ppb(N<sub>2</sub>O)

## Сток (выведение) из атмосферы

**CO<sub>2</sub>** – химический сток в атмосфере пренебрежимо мал; выводится из атмосферы, в основном, за счет

- растворения в недонасыщенных каплях влаги в атмосфере и последующего выпадения осадков; в океан за счет растворения в недонасыщенном поверхностном слое;
- растворения в недонасыщенных пресных водах суши (с последующим выносом в океан);
- поглощения растительным покровом суши и – весьма медленного – депонирования углерода в устойчивых формах.

**CH<sub>4</sub>** – разрушается в атмосфере в ходе химических и фотохимических реакций, в основном, в тропосфере при реакции с гидроксил-радикалом и в стратосфере за счет реакции с атомарным хлором; время жизни - примерно 12.4 года.

**N<sub>2</sub>O** – в тропосфере практически не расходуется; разрушается в стратосфере в реакциях  $\text{NO}_2 + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow 2\text{NO}$  и  $\text{N}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$ . Время жизни – примерно 121 год.

## **Основные антропогенные источники выбросов парниковых газов в атмосферу:**

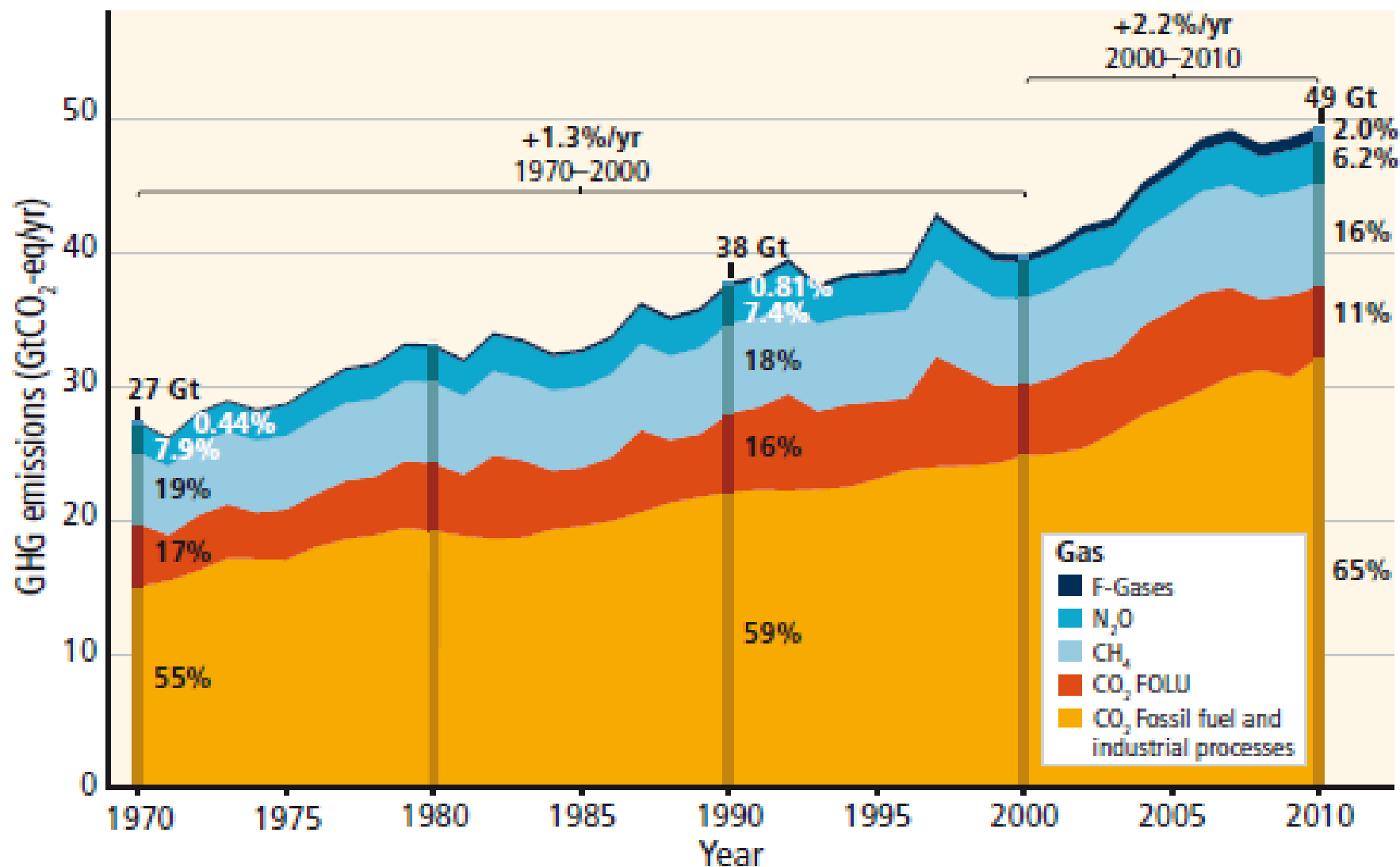
**Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ):** Использование ископаемого топлива (уголь, нефть, газ) и производство цемента – основной антропогенный источник этого газа.  $\text{CO}_2$  также выделяется при прямых антропогенных воздействиях в лесном хозяйстве и при других видах землепользования (например, при сведении лесов, в том числе для целей сельского хозяйства, вследствие деградации почв).  $\text{CO}_2$  может изыматься из атмосферы при восстановлении лесов, улучшении состояния почв и других процессах.

**Метан ( $\text{CH}_4$ ):** Выделяется, в том числе, при ведении сельского хозяйства, переработке отходов, использовании энергии, сжигании биомассы.

**Закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ):** Выделяется, в том числе, при ведении сельского хозяйства (например, при использовании некоторых удобрений), при использовании установок внутреннего сгорания.

**Фторсодержащие газы:** Источники - процессы промышленного производства, криогенные процессы, использование множества товаров широкого потребления. Основные вещества - гидрофторуглероды (HFCs), перфторуглероды (PFCs), гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ).

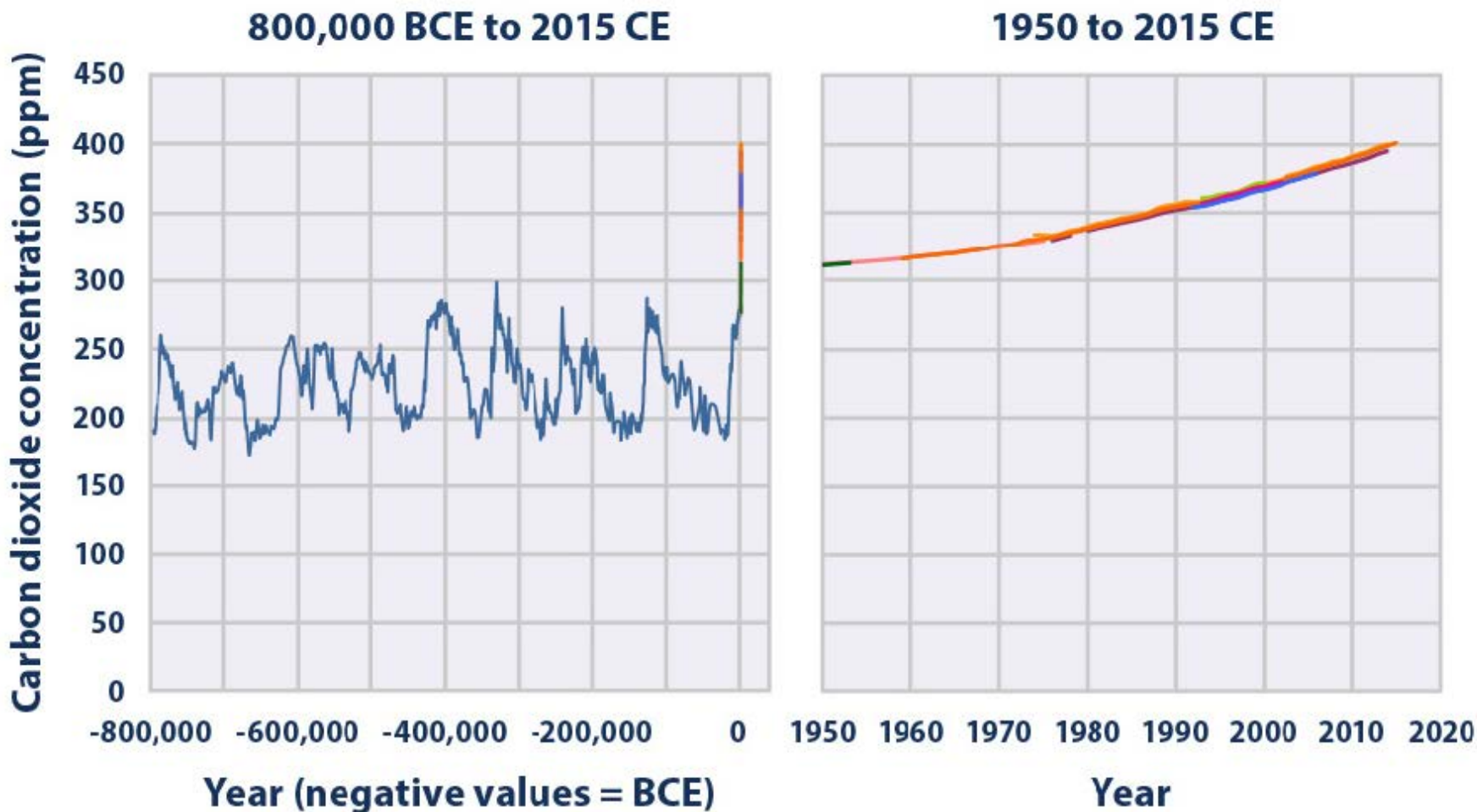
## Total annual anthropogenic GHG emissions by gases 1970–2010



Суммарные годовые эмиссии парниковых газов (ГтСО<sub>2</sub>экв /год) в 1970 – 2010 гг.: СО<sub>2</sub> от процессов сгорания и промышленности, СО<sub>2</sub> от лесного хозяйства и других видов землепользования (FOLU); метан (СН<sub>4</sub>); закись азота (N<sub>2</sub>O); хлорированные газы, подпадающие под условия Киотского протокола (IPCC, 2014).

# Концентрации углекислого газа за последние 800 000 лет и 1950-2015 гг.

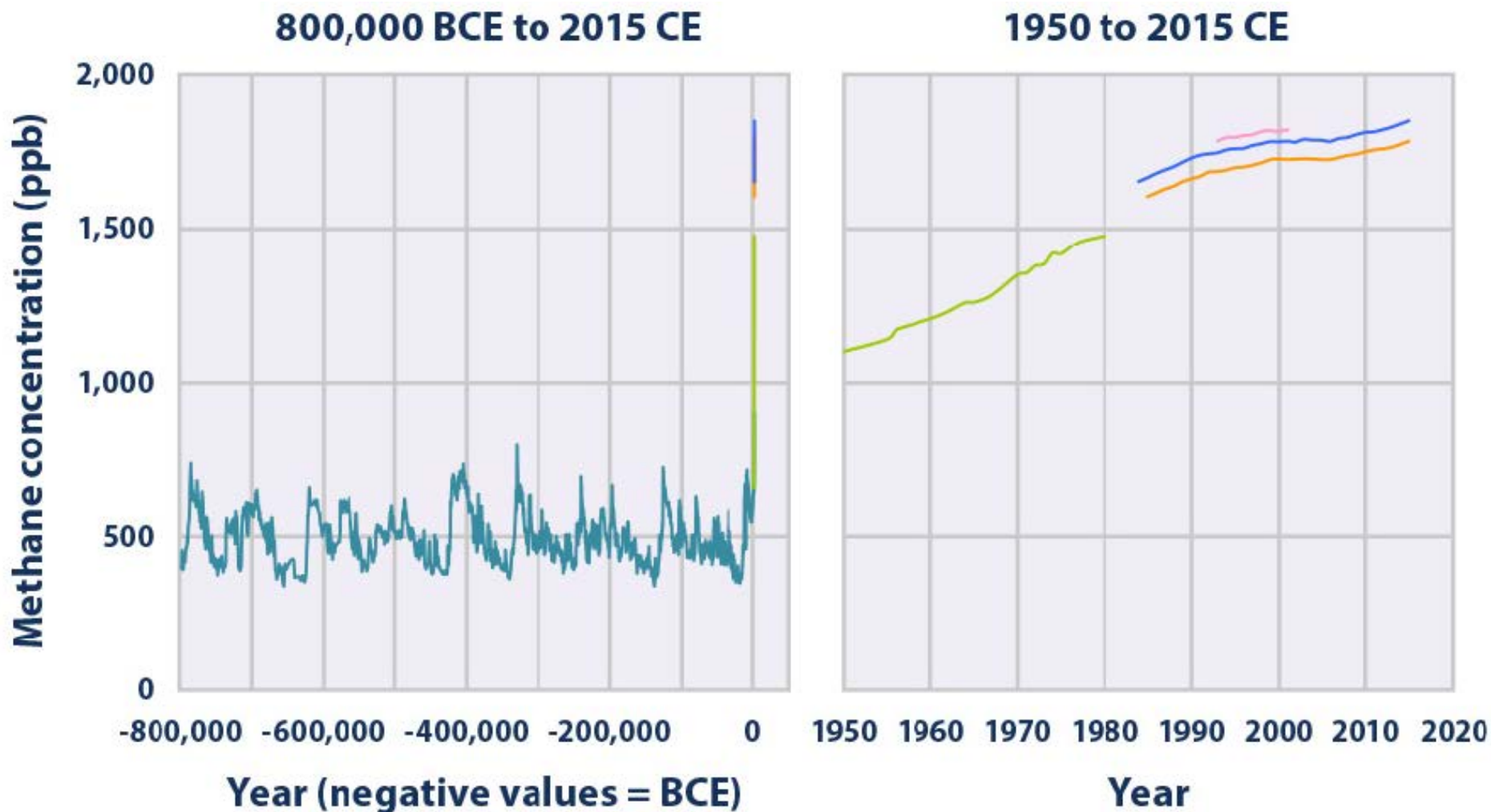
Climate Change Indicators in the United States: Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases - [www.epa.gov/climate-indicators](http://www.epa.gov/climate-indicators) - Updated August 2016





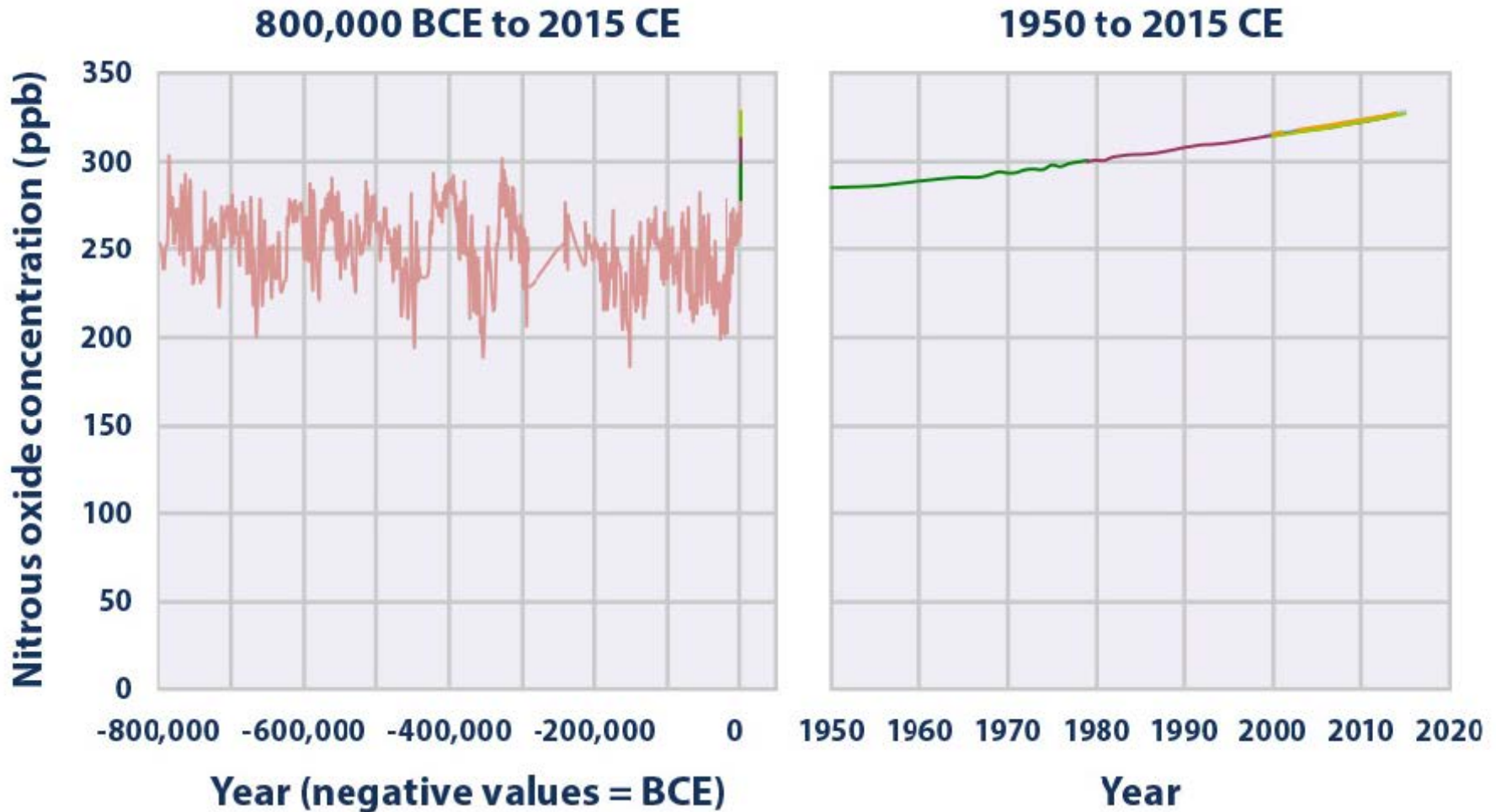
# Концентрации метана за последние 800 000 лет и 1950-2015 гг.

Climate Change Indicators in the United States: Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases - [www.epa.gov/climate-indicators](http://www.epa.gov/climate-indicators) - Updated August 2016



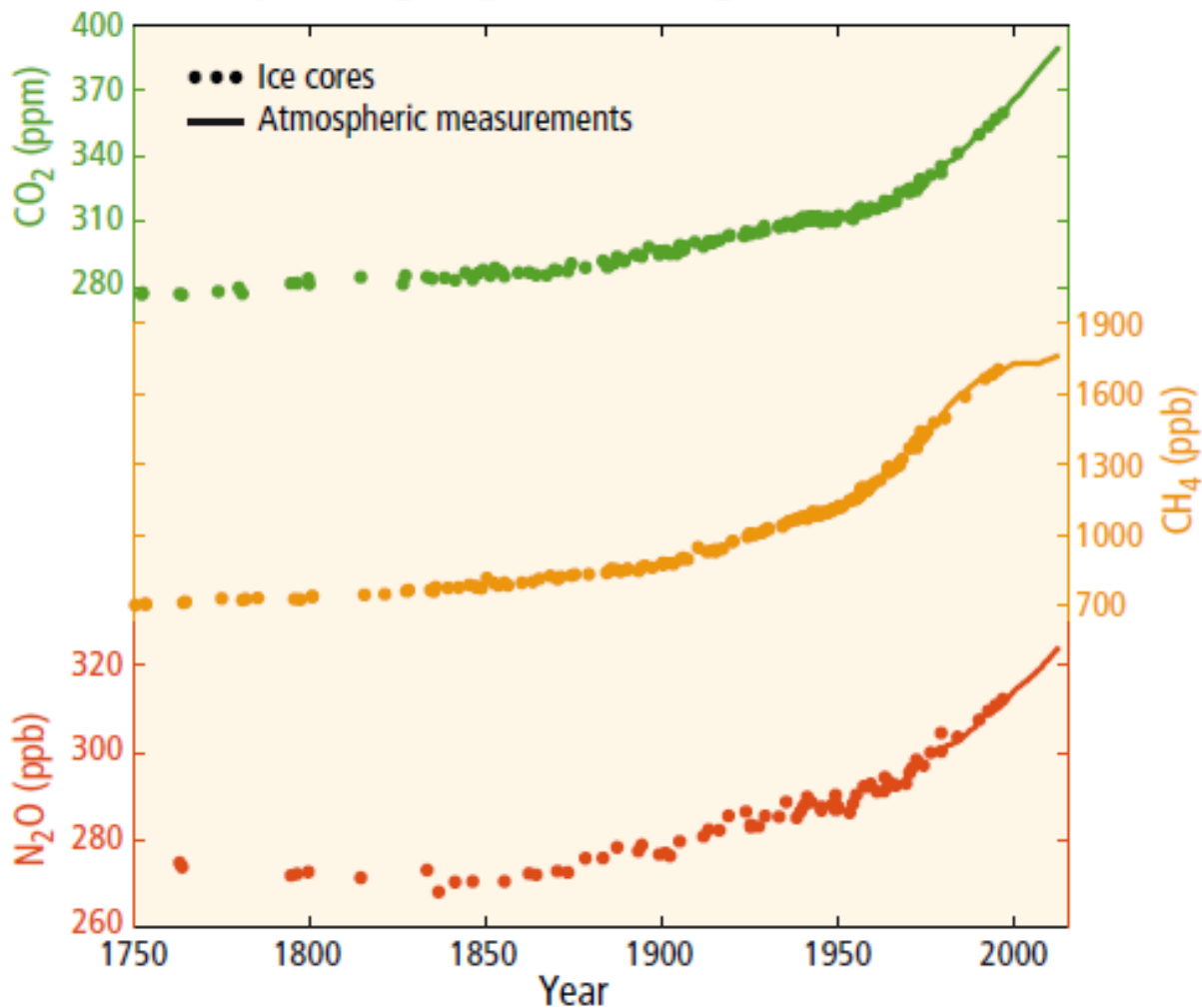
# Концентрации закиси азота за последние 800 000 лет и 1950-2015 гг.

Climate Change Indicators in the United States: Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases - [www.epa.gov/climate-indicators](http://www.epa.gov/climate-indicators) - Updated August 2016



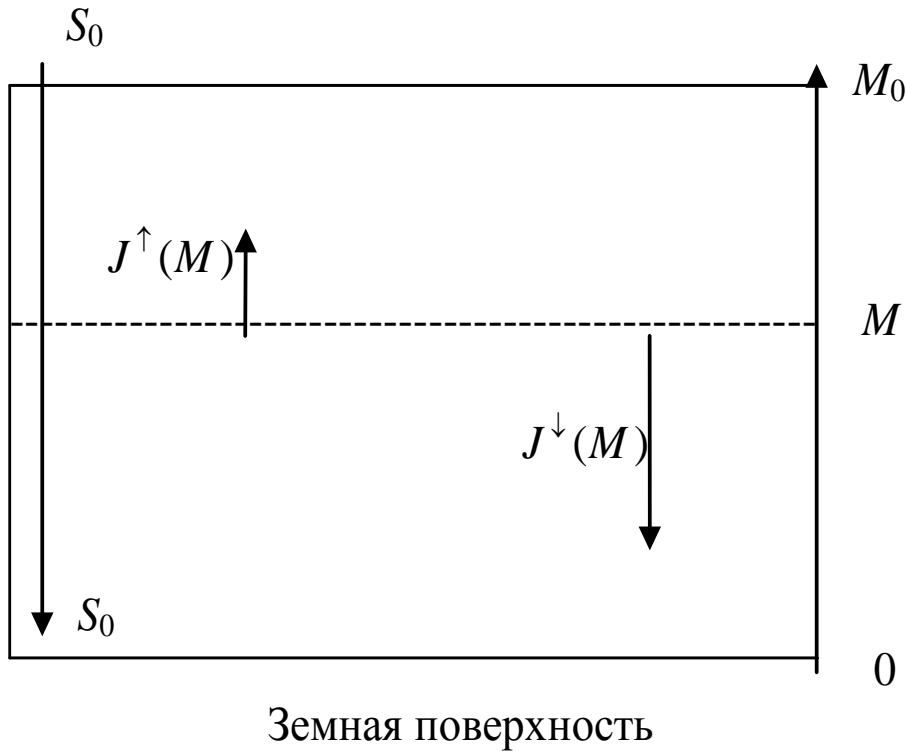
## Средние глобальные концентрации

### Globally averaged greenhouse gas concentrations



**Обогащение атмосферы парниковыми газами (AR5 WG1 SPM) в результате антропогенных эмиссий приводит к усилению парникового эффекта и потеплению в приповерхностном слое.**

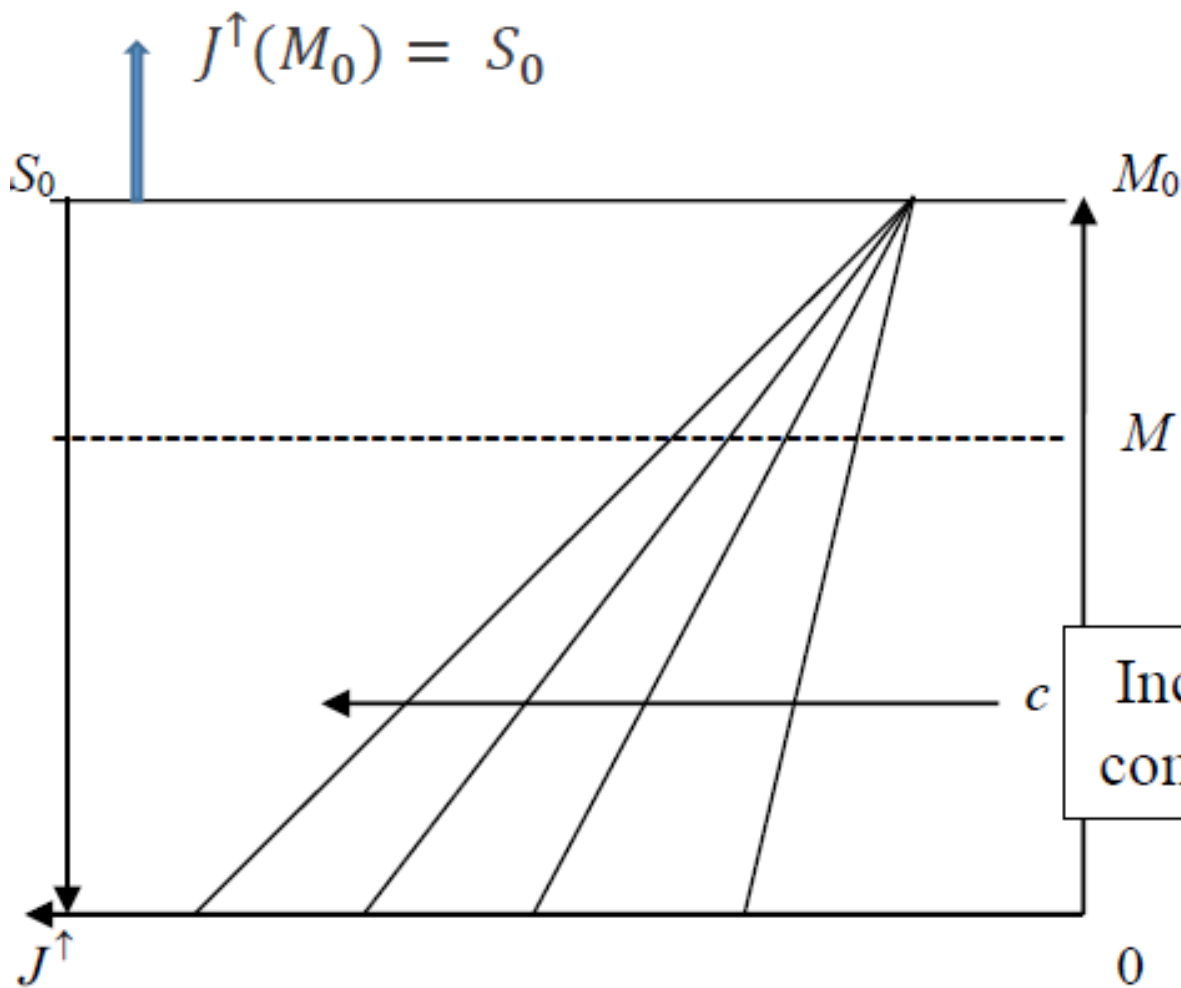
# Упрощенная схема радиационного равновесия



$$\frac{dJ^{\downarrow}(M)}{d(-M)} = -w(M)J^{\downarrow} + 0.5w(M)(J^{\downarrow}(M) + J^{\uparrow}(M))$$

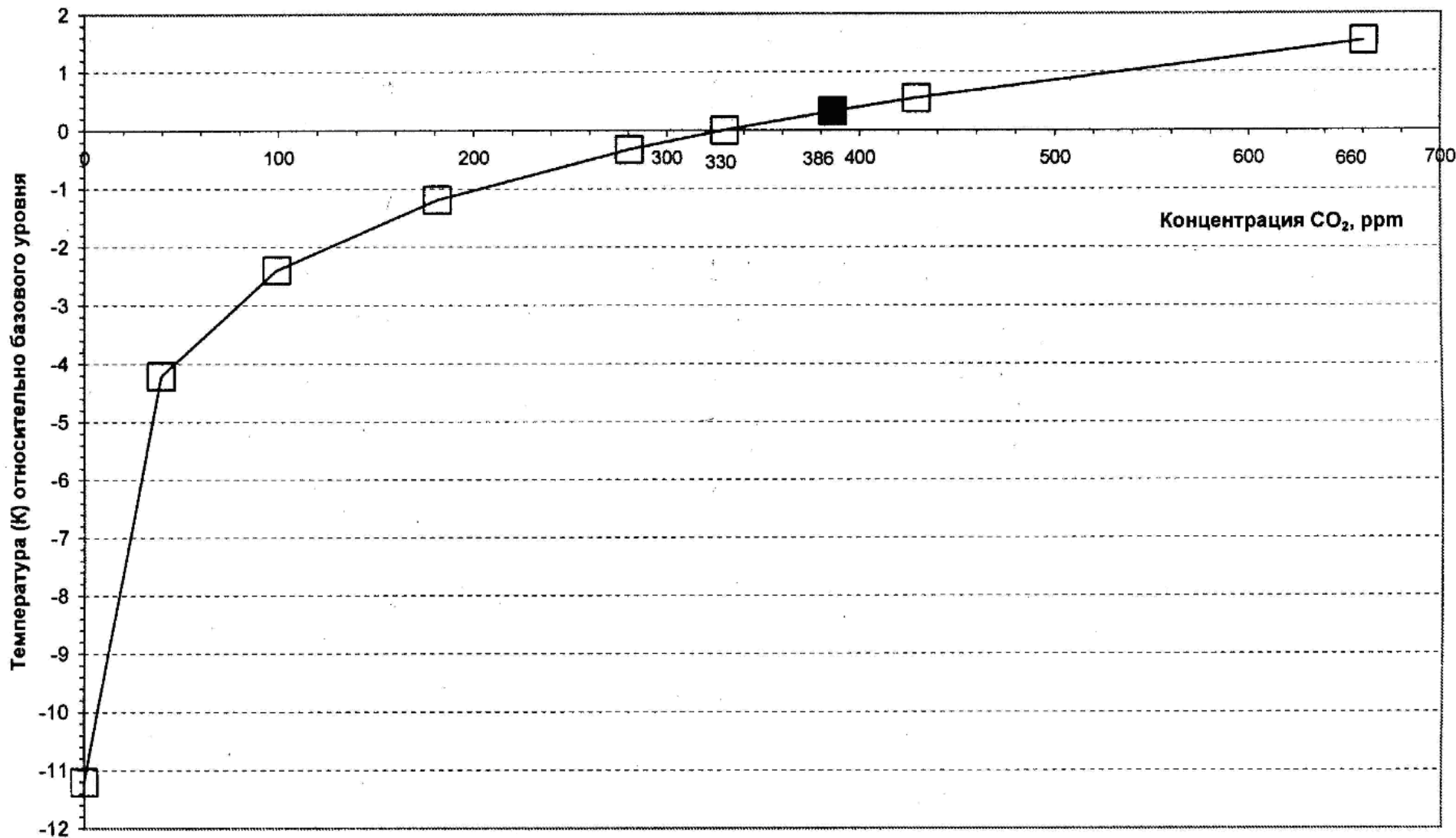
$$S_0 + J^{\downarrow}(M) = J^{\uparrow}(M); J^{\downarrow}(M_0) = 0$$

$$\frac{dJ^{\uparrow}(M)}{dM} = -w(M)J^{\uparrow} + 0.5w(M)(J^{\downarrow}(M) + J^{\uparrow}(M))$$



**Упрощенная схема усиления парникового эффекта ( $w(M) = w_0$ ):**

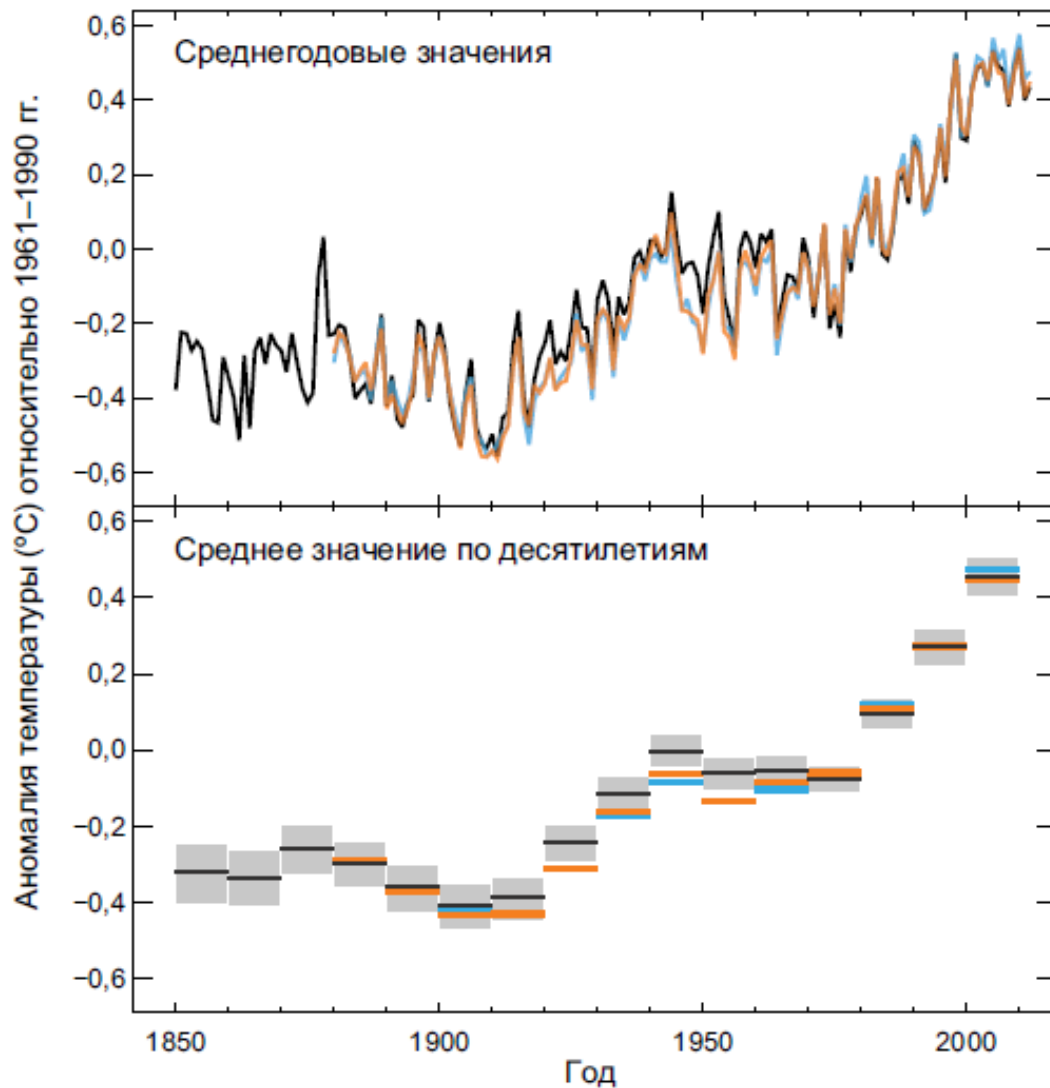
$S_0$  - коротковолновый поток на верхнем пределе атмосферы (для простоты предполагается, что она прозрачна для солнечного потока);  $M_0$  - полная масса газов в столбе атмосферы;  $c$  - содержание ПГ;  $J^{\uparrow}$  - восходящий поток длинноволнового излучения;  $J^{\uparrow}(M) = S_0(1 + 0.5 w(M_0 - M))$ ;  $J^{\uparrow}(0) = \sigma T_0^4$ .



**Изменение радиационно-равновесной температуры (K) земной поверхности при изменении содержания CO<sub>2</sub>, полученная с помощью спектральной радиационной модели, использующей современные спектроскопические данные; нуль соответствует значению в 1970 г.**

**Концентрации 1970х (с\*), чувствительность радиационно-равновесной температуры земной поверхности к малому увеличению содержания парниковых газов и прирост температуры при с\* x 10**

<b>Газ</b>	<b>с* , ppm</b>	<b><math>\Delta T / \Delta c</math> (K/ppm)</b>	<b><math>\Delta T</math> при (с* x 10), K</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>7750</b>	<b>0.001</b>	<b>-</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>330</b>	<b>0.006 – 0.007</b>	<b>7.9</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>1.7</b>	<b>0.08 - 0.09</b>	<b>0.8</b>
<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>0.32</b>	<b>0.7 - 0.9</b>	<b>1.3</b>

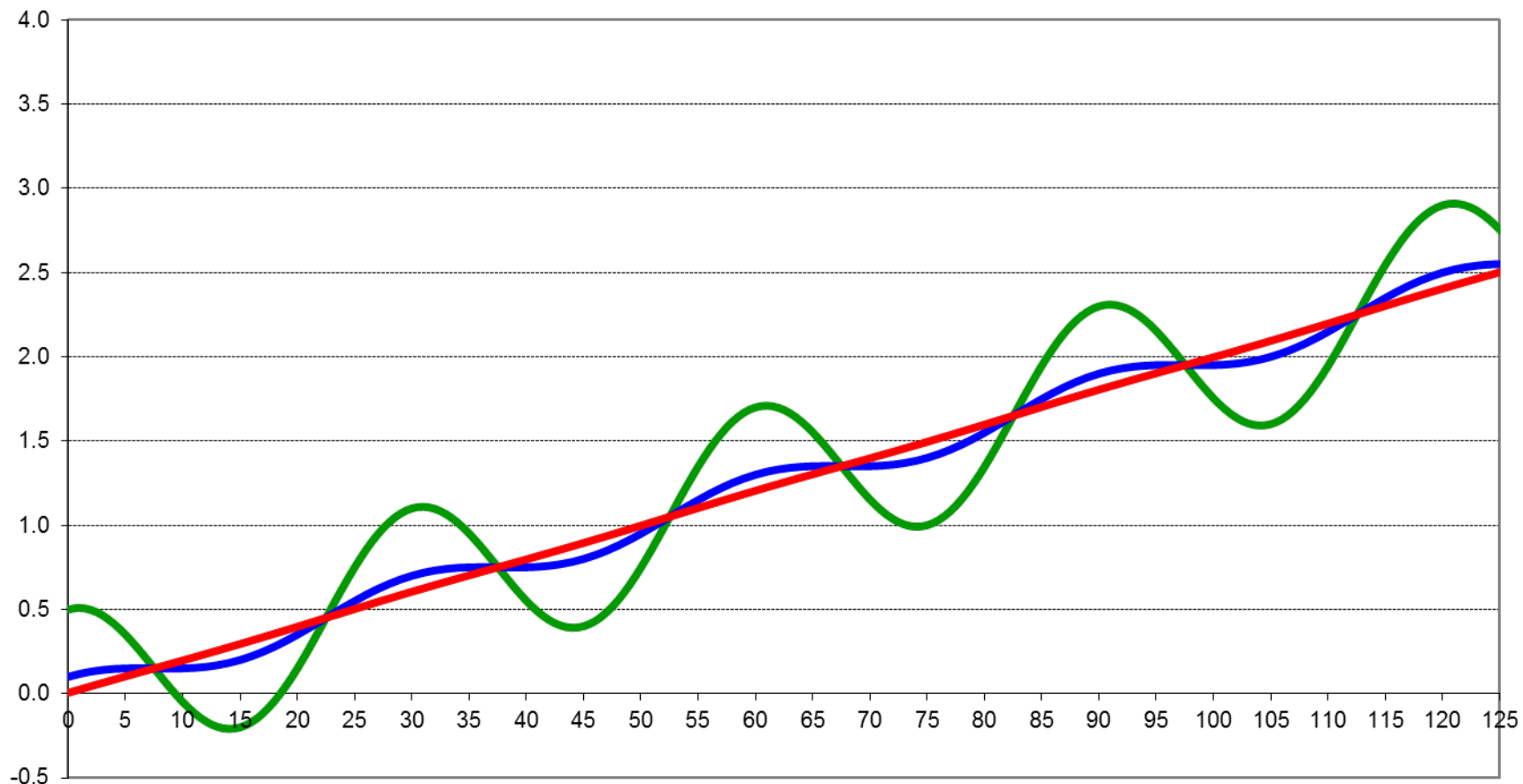


Каждое из трех последних десятилетий характеризовалось более высокой температурой у поверхности Земли по сравнению с любым предыдущим десятилетием начиная с 1850 г. В Северном полушарии 1983–2012 годы были, самым теплым 30-летним периодом за последние 1 400 лет (AR5 WGI SPM, AR5 SYR).

**Изменение средней глобальной приземной температуры воздуха (аномалии vs. 1961-1990 гг.)**

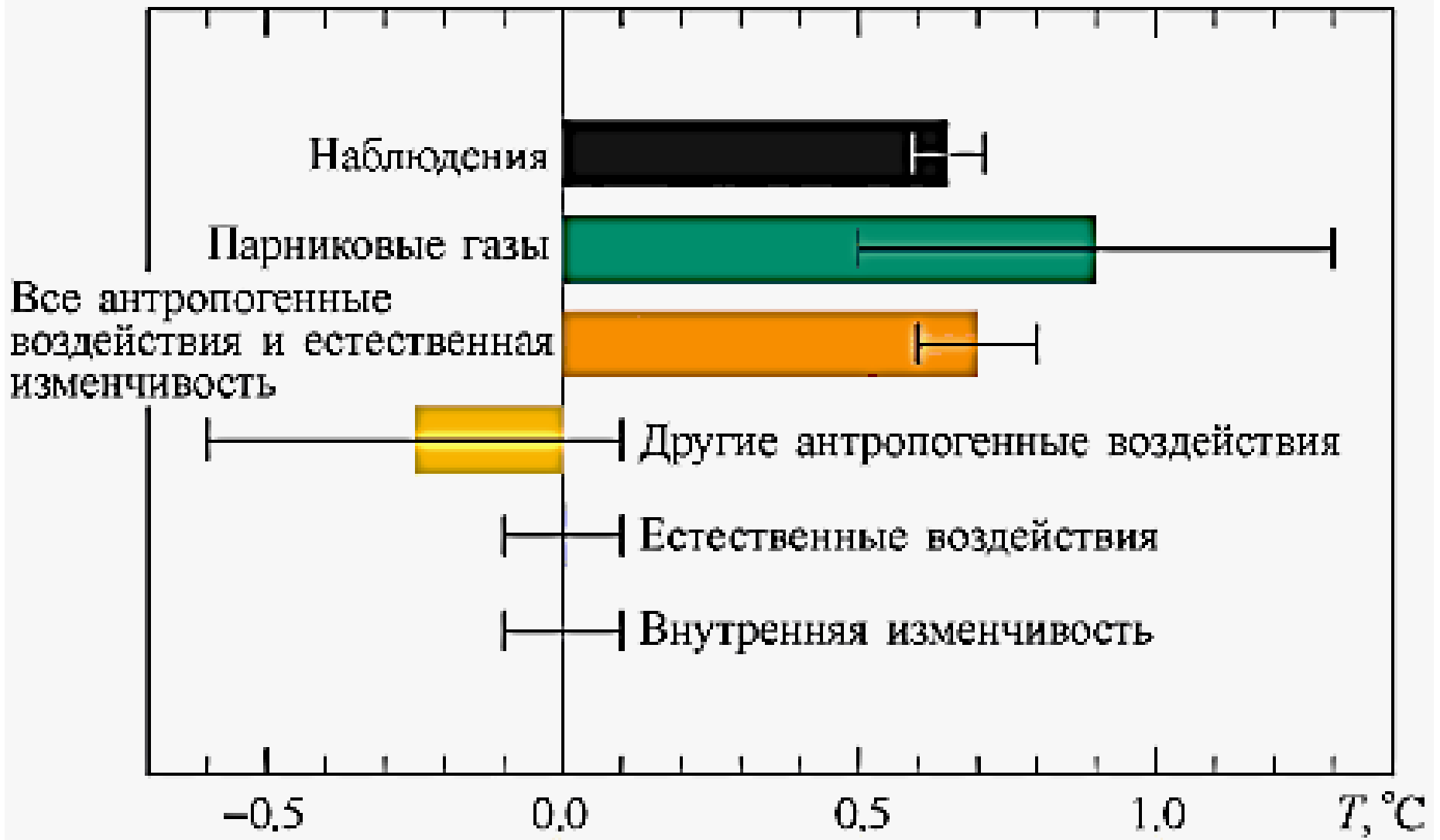


# ИЛЛЮСТРАЦИЯ: вековой тренд (потепления) и 30-летние колебания

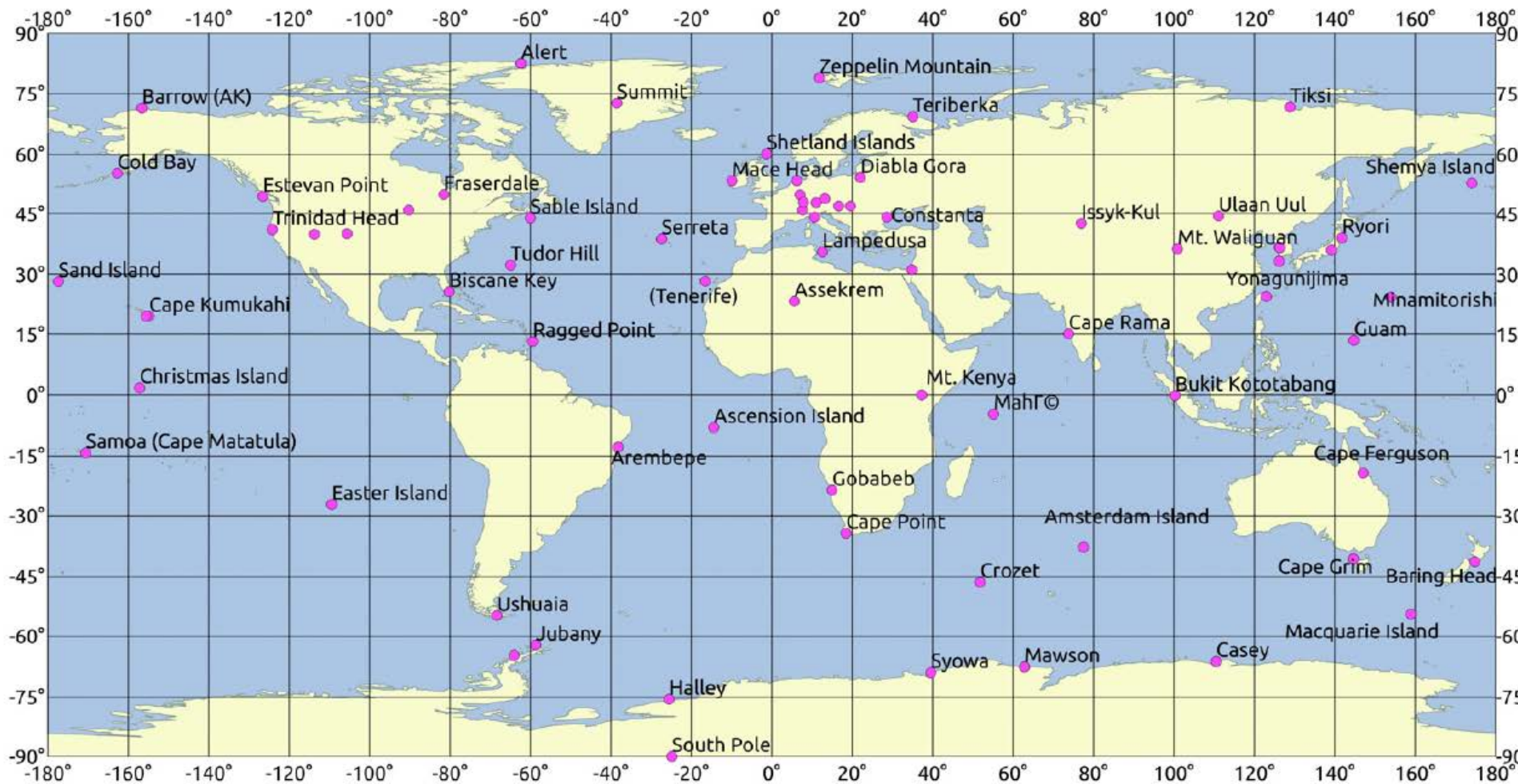


$$T = 0.5\cos(2\pi t/30) + 0.02t \quad T = 0.1\cos(2\pi t /30) + 0.02t$$

$$T = 0.005\cos(2\pi t/30) + 0.02t$$



Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада разных факторов в линейный тренд наблюдавшегося глобального потепления в 1951– 2010 гг. (IPCC, 2014a)



**Станции, где осуществляется мониторинг уровней содержания парниковых газов в приповерхностном слое атмосферы (80, из них 20 – глобальных фоновых)**

*Названия некоторых станций не приведены на этой карте-схеме, например, западноевропейских, из-за нехватки места на рисунке*

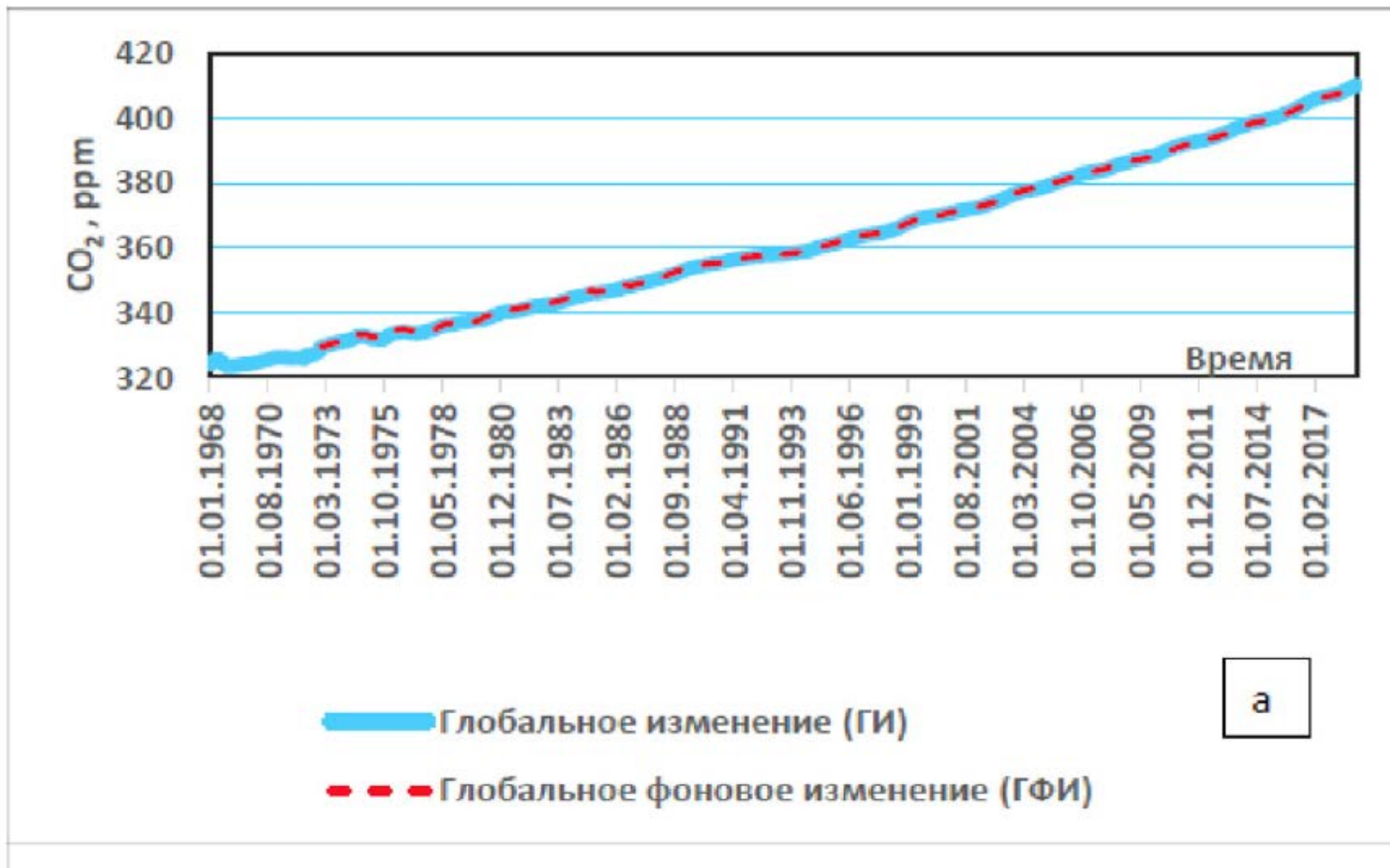
**{A(n)}** стационарный ряд среднемесячных концентраций. Для данной станции  $n = 1$  соответствует тому месяцу, когда впервые были проведена оценка среднемесячной концентрации, а  $n = N$  соответствует порядковому номеру последнего месяца, для которого есть значения среднемесячной концентрации. Нумерация месяцев – сплошная.

Ряд скользящих двенадцатимесячных средних  $B(n) = [0.5 A(n - 6) + A(n - 5) + \dots + A(n + 5) + 0.5 A(n + 6)] / 12$ .

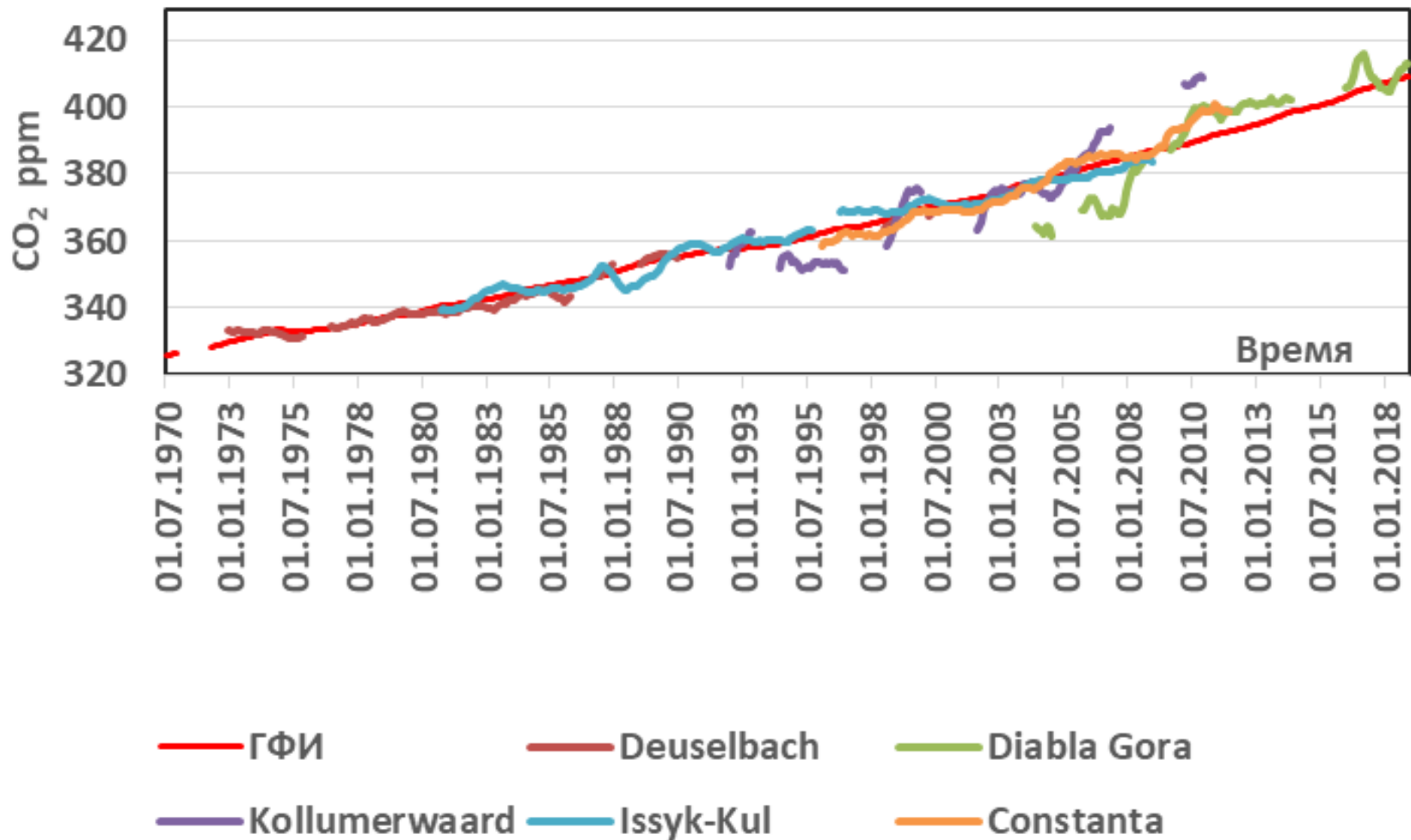
*Месяцы*

$n - 6$	$n - 5$	$n - 4$	$n - 3$	$n - 2$	$n - 1$	$n$	$n + 1$	$n + 2$	$n + 3$	$n + 4$	$n + 5$	$n + 6$

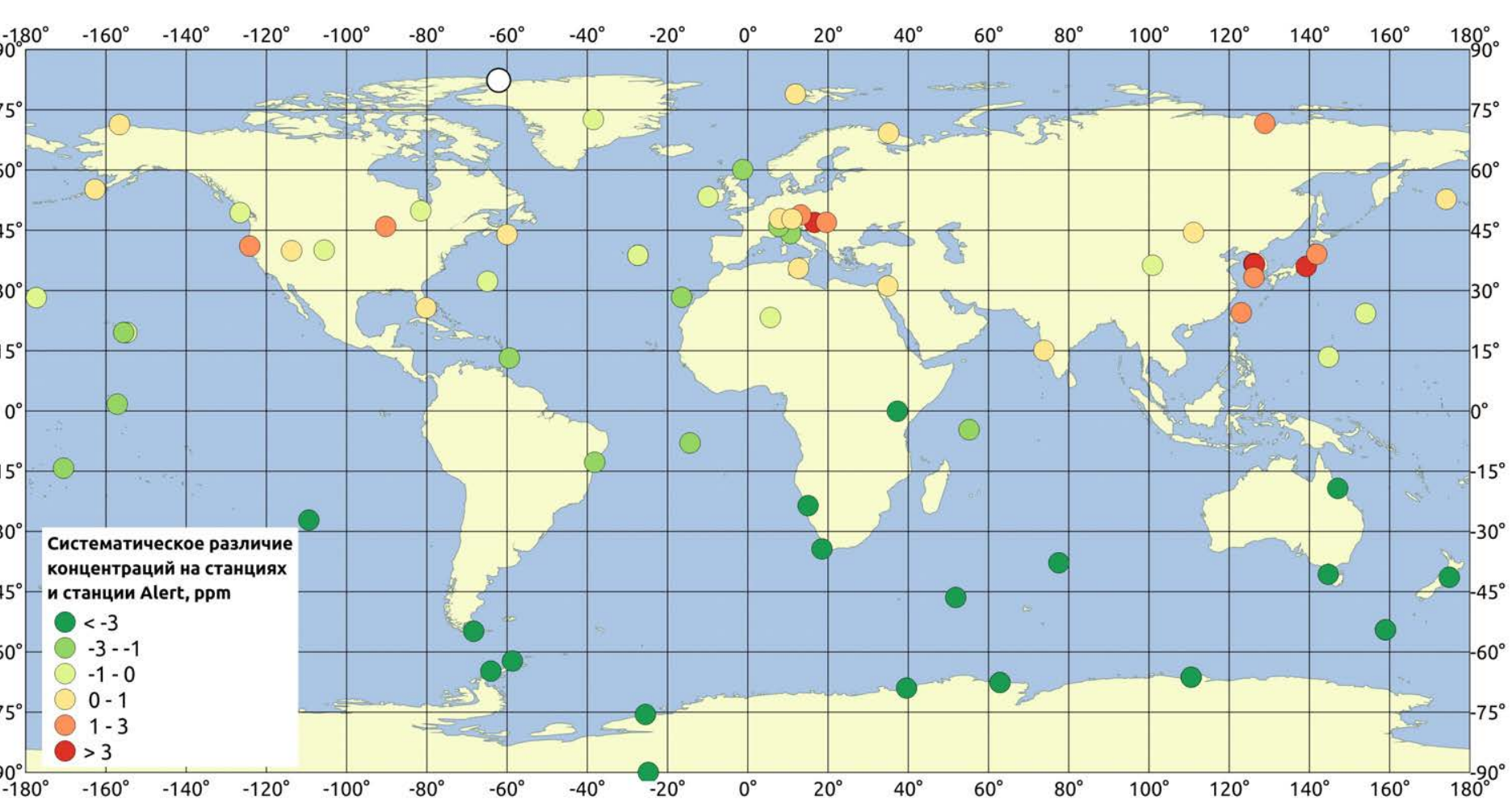
Для описания короткопериодной изменчивости среднемесячных концентраций используется ряд **{C(n)}**,  $C(n) = A(n) - B(n)$ .



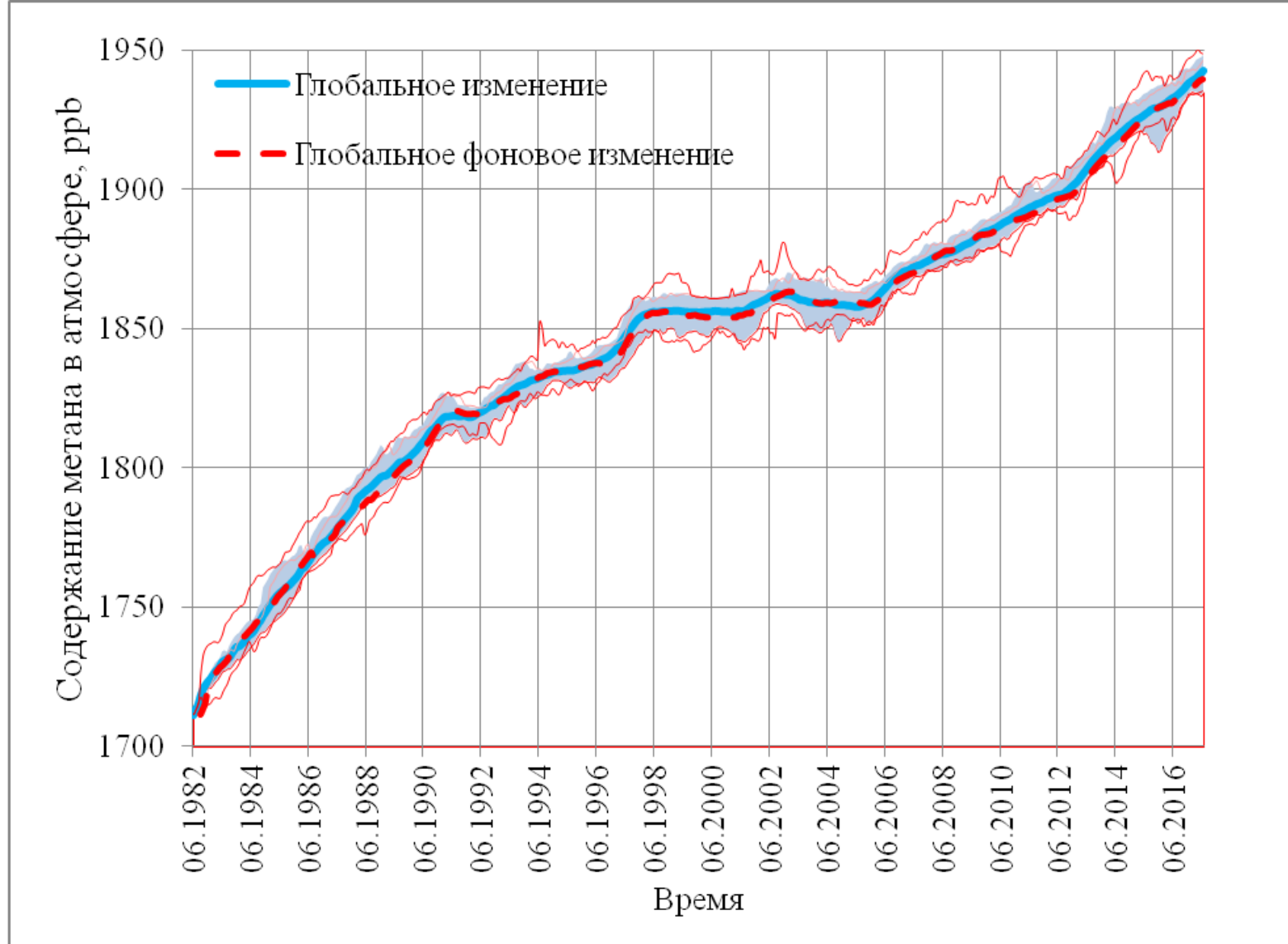
Многолетние изменения содержания CO<sub>2</sub> в приповерхностном слое атмосферы на станциях мониторинга,  $V^*(n)$ , ppm: ГФИ – глобальное фоновое изменение (среднее по глобальным станциям) и ГИ – для всех станций, кроме аномальных



**Многолетние изменения содержания CO<sub>2</sub> в приповерхностном слое атмосферы на станциях мониторинга,  $V^*(n)$ , ppm: среднее глобальное фоновое изменение (ГФИ) и изменения на станциях Deuselbach, Diabla Gora, Kollumerwaard, Issyk-Kul и Constanta, исключенных из рассмотрения**

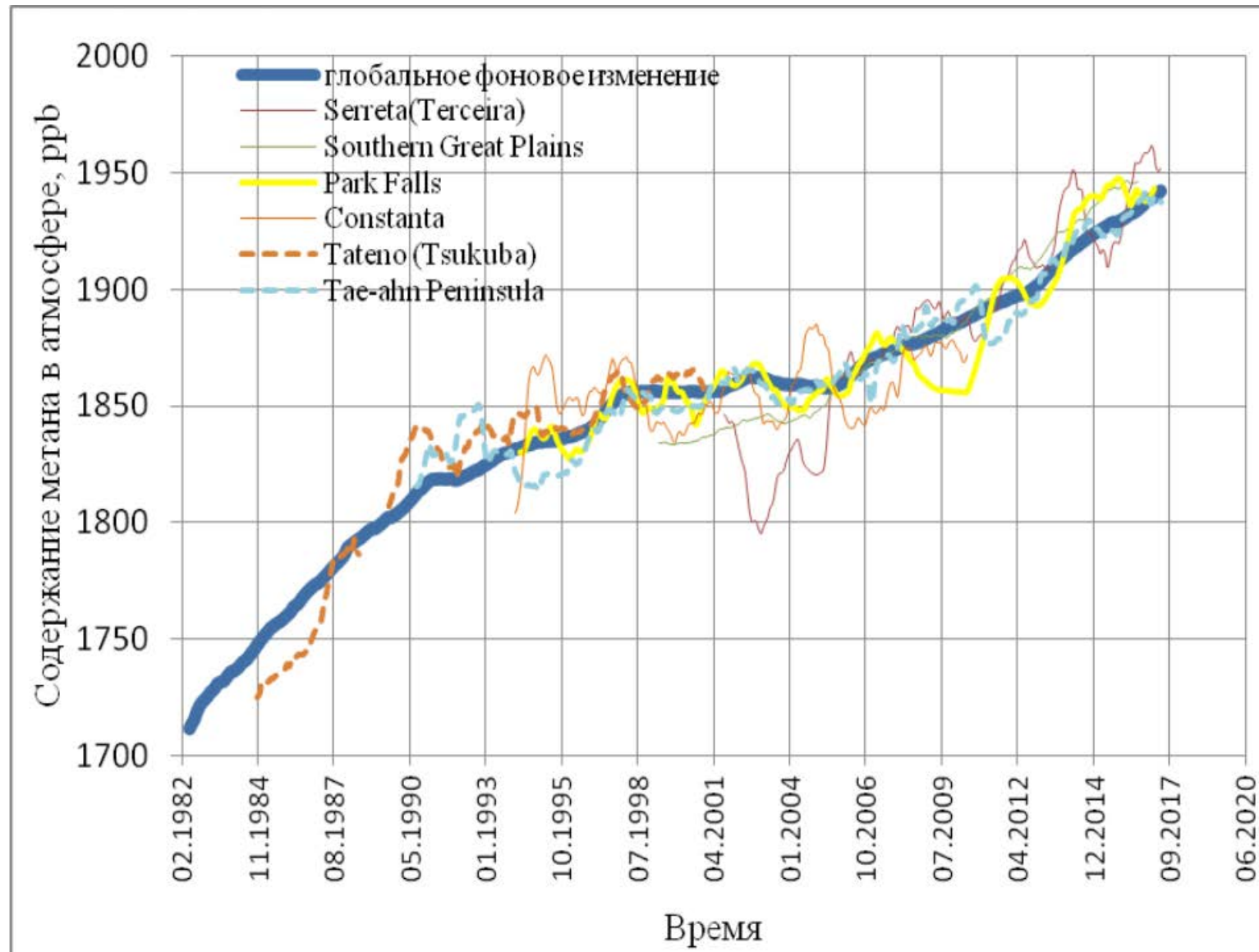


**Систематические различия в многолетних уровнях содержания CO<sub>2</sub> на разных станциях мониторинга и станции Alert**

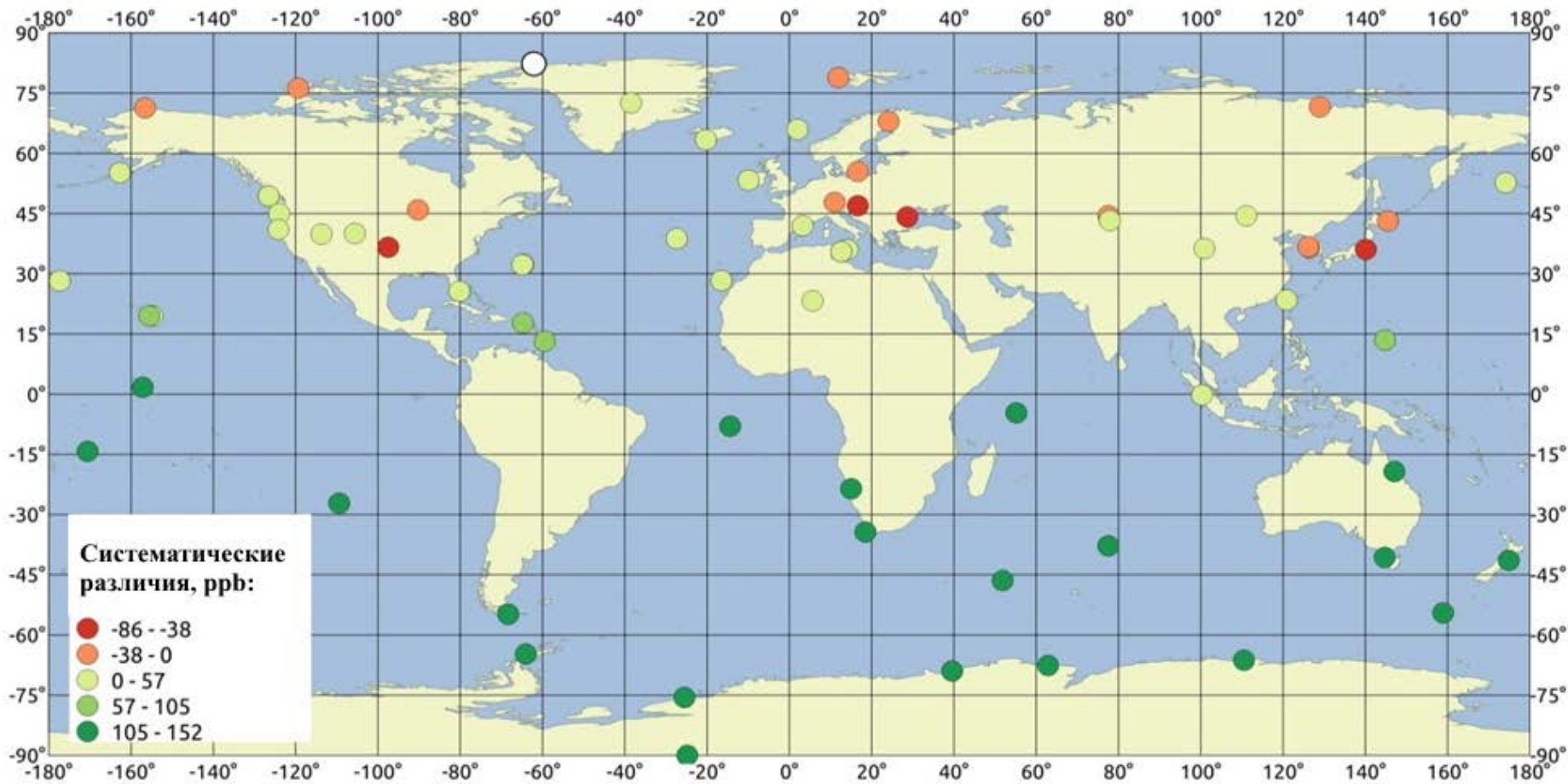


**Многолетние изменения содержания  $\text{CH}_4$  в приповерхностном слое атмосферы (ppb):** красный цвет – для группы глобальных станций (GB), а синий цвет – для группы региональных станций (RB); разность максимального и минимального индивидуального отклонения для станций от среднего тренда по их группе показана розовым и голубым фоном соответственно





**Многолетние изменения содержания  $\text{CH}_4$  в приповерхностном слое атмосферы (ppb) для группы региональных станций (RB, синий цвет) и индивидуальные изменения для «аномальных» региональных станций**



**Систематические различия в многолетних уровнях содержания CH<sub>4</sub> на станции Alert и других станциях**

## **ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ**

**В индустриальную эпоху произошло глобальное потепление в приповерхностном слое. С 1950 г. оно составило в среднем примерно 1°C.**

**Основная причина – значительное увеличение содержания некоторых парниковых газов в атмосфере CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> и некоторых других, что усилило естественный парниковый эффект.**

**Наряду с температурой, меняются и другие параметры климата: сумма осадков, скорость ветра, частота экстремальных погодных явлений и др. Все это наблюдается и в Северной Евразии, в том числе в России.**

**Последствия наблюдаемых и ожидаемых изменений климата для природных и социально-экономических систем – в основном, отрицательные (с точки зрения человека).**

**Для их оценки и обоснованного баланса усилий по смягчению изменения климата и адаптации к ним необходимы исследования, в том числе мониторинг состояния климатической системы и антропогенных воздействий на нее.**

**В этих исследованиях играют значительную и все возрастающую роль методы и технологии мониторинга земной системы, основанные на ИСЗ. В отличие от сетей станций**

**мониторинга, расположенных на земной поверхности, они позволяют (уже сейчас или в недалеком будущем) получать информацию принципиально нового типа – практически непрерывные образы полей физических переменных, характеризующих состояние климатической системы.**

**В этом ряду:**

- данные о полях концентраций парниковых газов и аэрозолей (как об общем содержании в столбе атмосферы, так и о распределении по высоте);**
- расчетные данные о полях выбросов этих веществ с земной поверхности в атмосферу, основанные на данных измерений полей концентраций и полей ветра;**
- оценки содержания углерода в компонентах наземных экосистем, основанные на данных измерений параметров растительного покрова суши;**
- оценки потоков  $\text{CO}_2$ , поглощаемых растениями на суше и в поверхностном слое океана, основанные на данных измерения содержания хлорофилла;**
- данные о состоянии объектов криосферы – ледниках и ледниковых покровах.**

**За этими направлениями, несомненно, большое будущее.**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

