

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

С.М. Семенов

**Заседание научного семинара Института географии Российской
академии наук, 21 января 2016 г.**

СОДЕРЖАНИЕ

Что такое парниковый эффект;

Какова его роль в формировании климата Земли;

Каким образом человек усиливает базовый парниковый эффект;

Какие типичные недоразумения возникают при интерпретациях.

Климат – средние параметры погоды и показатели ее изменчивости за продолжительный период времени (1 - 2 - 3 десятилетия).

Климат формируется в ходе взаимодействия различных элементов климатической системы Земли – «машины», порождающей климат.

Она состоит из атмосферы, гидросферы (включая криосферу), биосферы, педосферы (почвогрунты).

Между ними есть потоки вещества и энергии, причем основной первичный источник энергии - Солнце.

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ АТМОСФЕРА+ЗЕМНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Рассеяние;

Излучение – поглощение;

Адвекция;

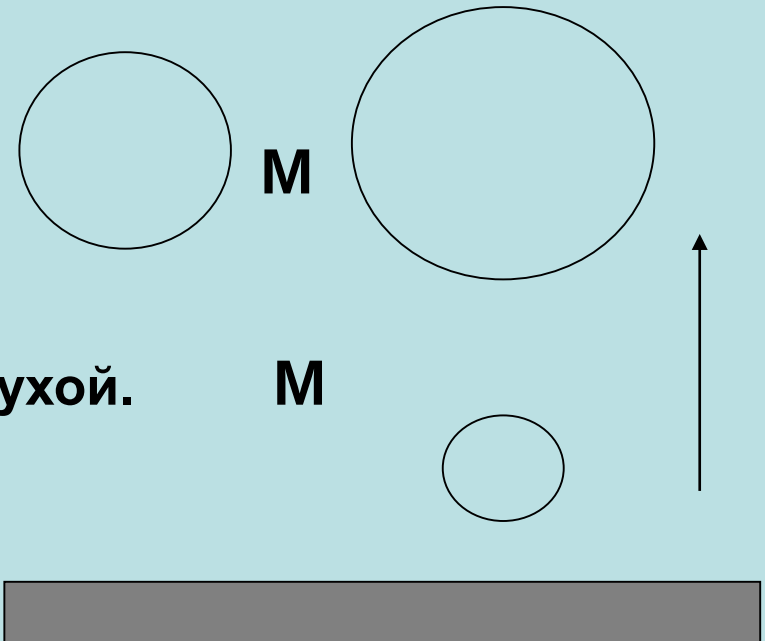
Конвекция: развивается

при градиенте температуры $> 6^{\circ}\text{C}/\text{км}$

во влажной атмосфере и $> 9.8^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в сухой.

$$T \sim p^{(k-1)/k}$$

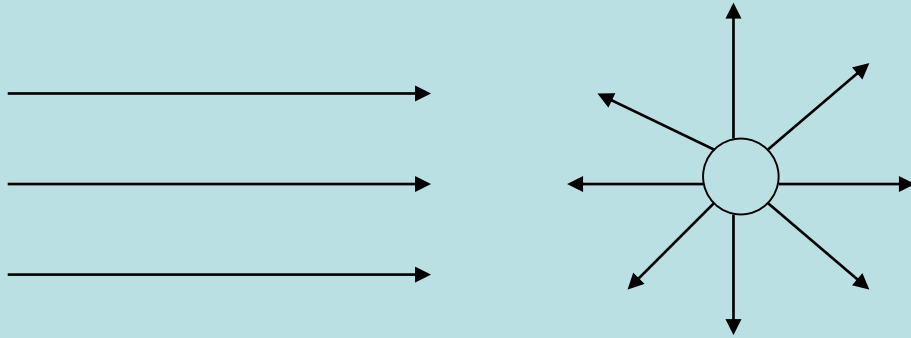
$k > 1$; воздух ≈ 1.4



Скрытое тепло: испарение-конденсация воды;

.....

РАССЕЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ (scattering)

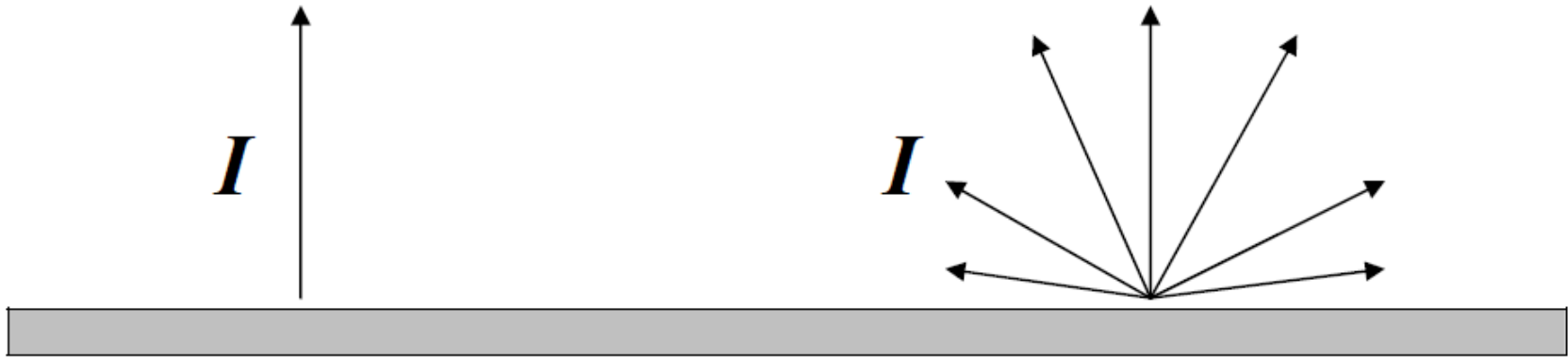


Монохроматический поток излучения заданного направления, набегающий на частицу, взаимодействует с ней, в результате чего от нее исходит излучение **той же частоты**, но разных направлений в определенных пропорциях.

Свойство излучения рассеиваться ухудшается с длиной волны пропорционально ее четвертой степени.

Отражение включено в рассеяние, это – «рассеяние назад».

ИЗЛУЧЕНИЕ / ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ



Абсолютно черное тело

**Какова мощность излучения в полусферу
при абсолютной температуре T ?**

А у реального тела?

Закон Стефана-Больцмана – суммарная мощность излучения (в полусферу) абсолютно черного тела при абсолютной температуре T :

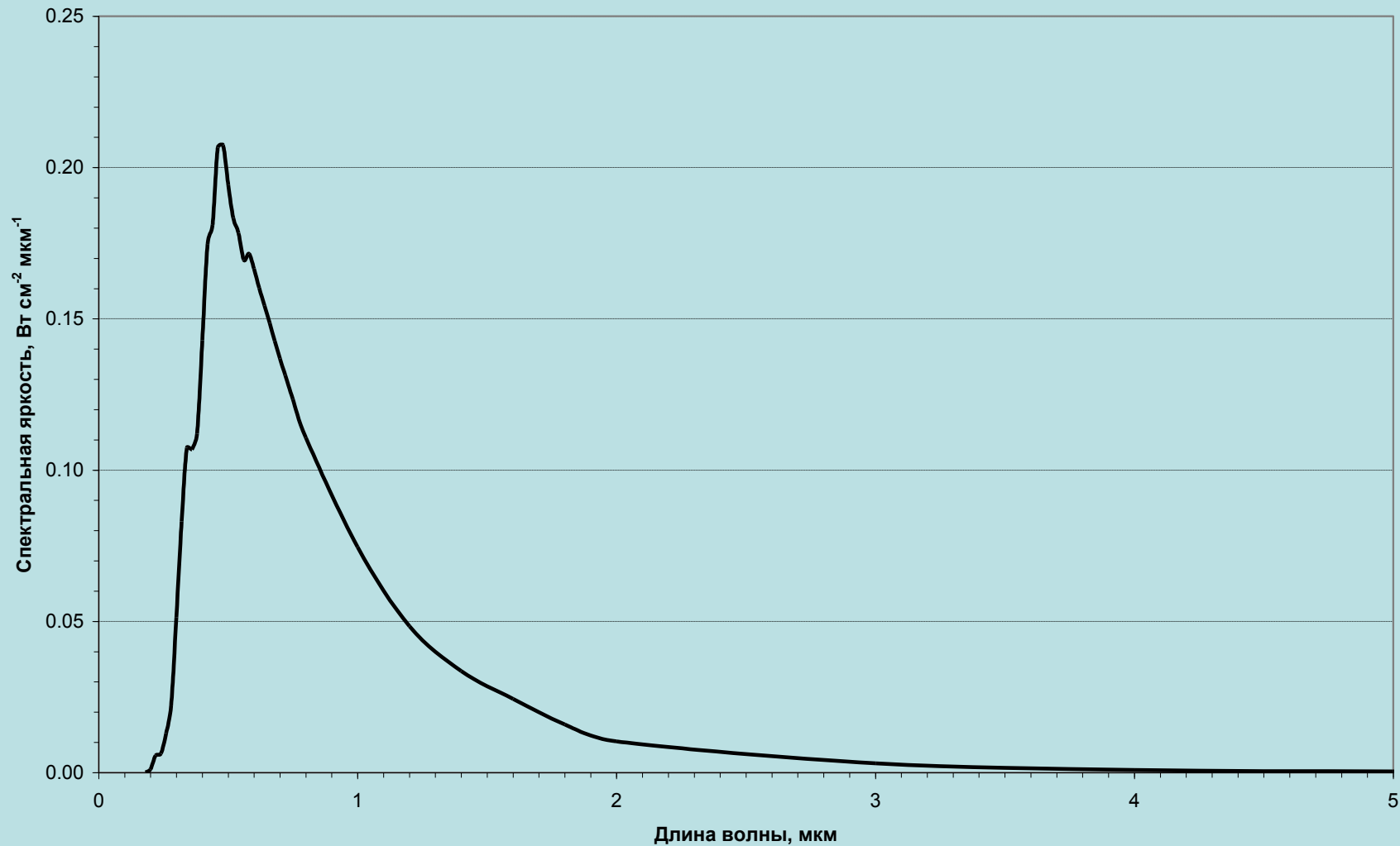
$$I = \sigma T^4$$

Формула Планка – распределение потока излучения (в полусферу) по длине волны:

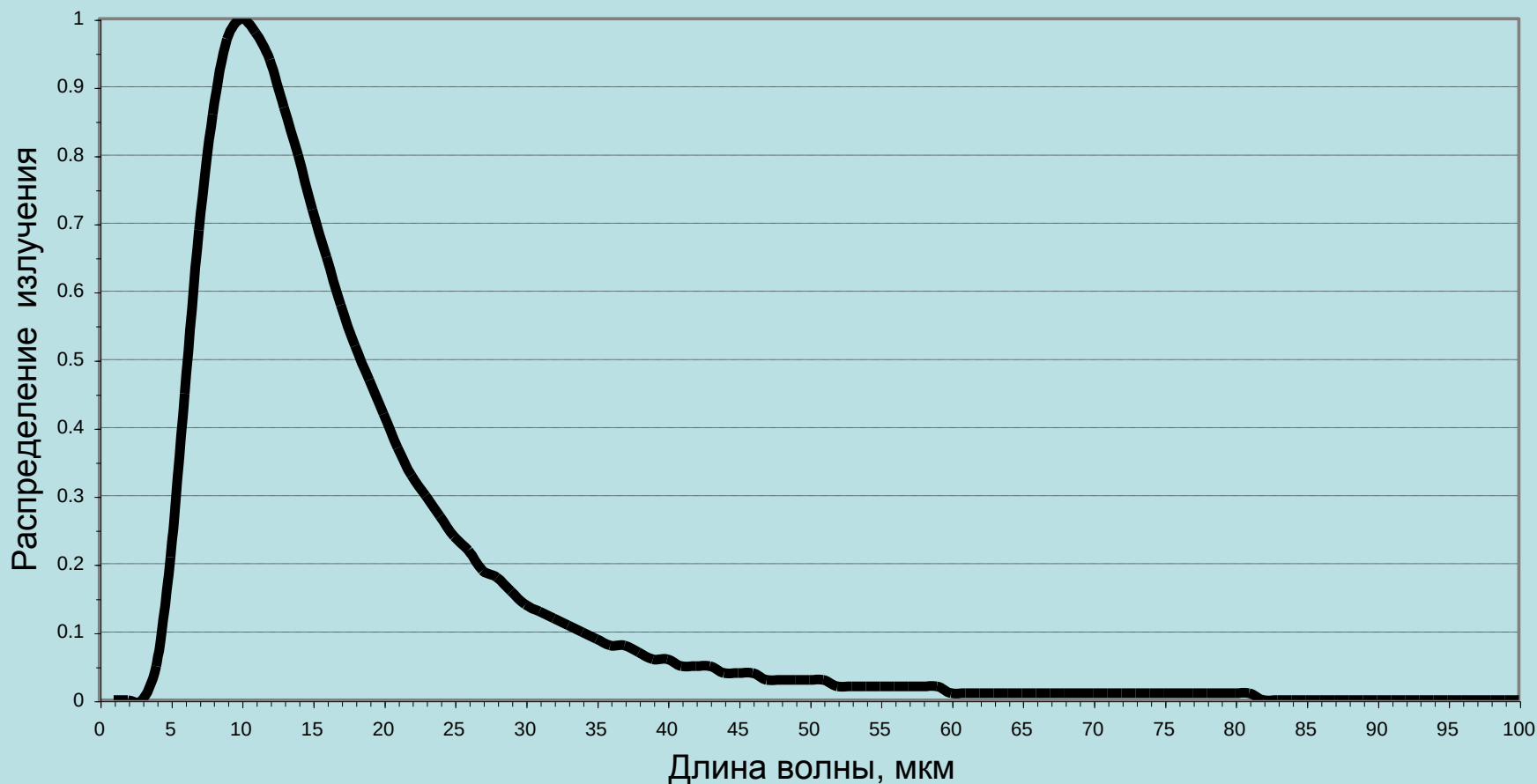
$$u_p(\lambda, T) = \frac{4\pi^2 \hbar c^2}{\lambda^5 (\exp(2\pi \hbar c / \lambda k T) - 1)},$$

Закон излучения Кирхгофа:

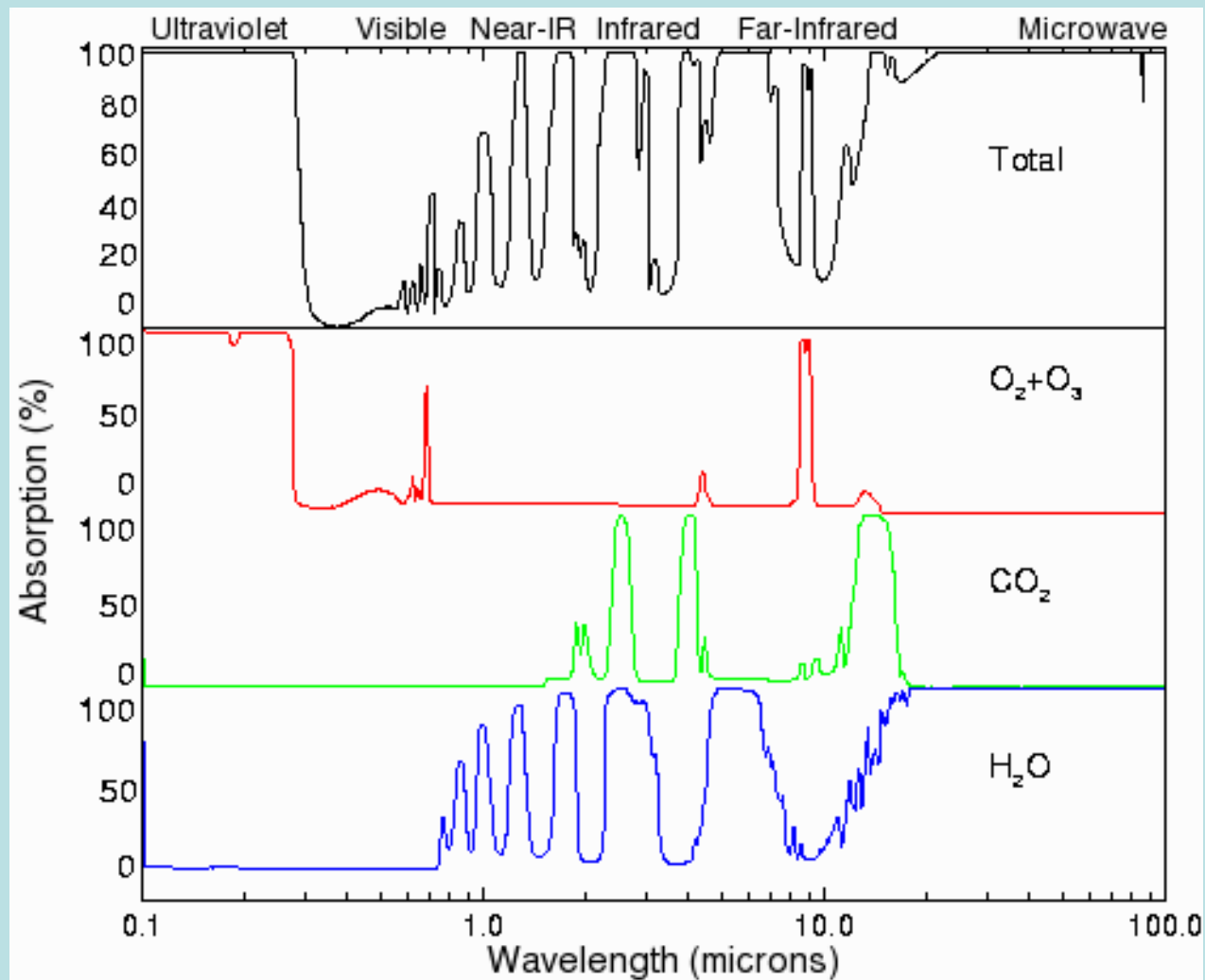
Отношение излучательной способности любого тела к его поглотительной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной длины волны и не зависит от их формы и химической природы.



Распределение потока солнечного излучения (спектральная яркость), на верхней границе атмосферы, по длине волны (Матвеев, 2002, с. 133); близко к распределению излучения черного тела при температуре около 5800 К.



Распределение излучения земной поверхности (абсолютно черного тела по длинам волн при температуре поверхности 288.15 K) в долях максимальной спектральной яркости

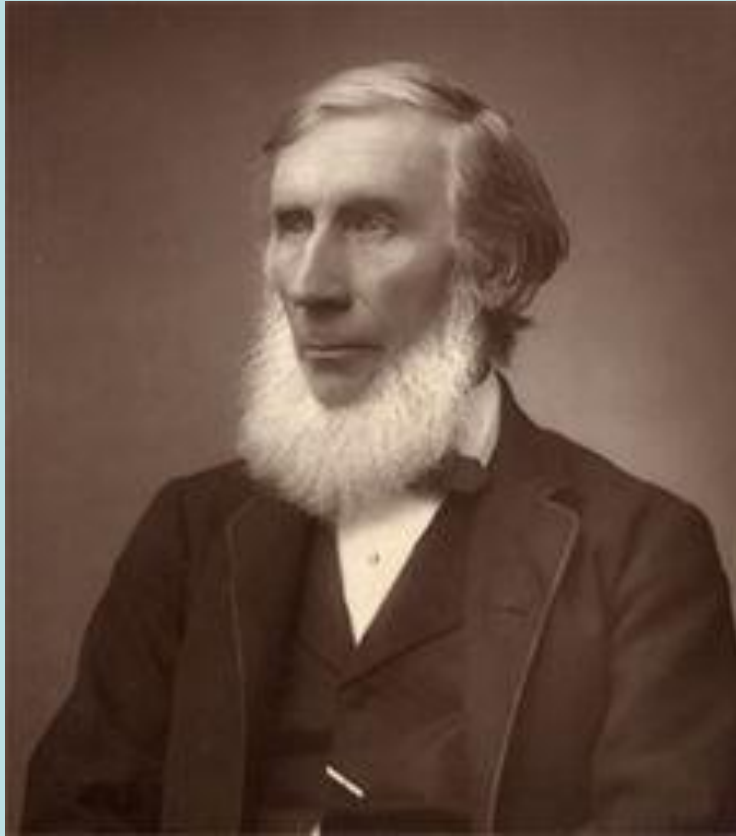


Поглощательная способность атмосферы в целом

Science Notes. March 17, 2003

T.J.Nelson
tjnelson@brneurosci.org

John Tyndall



Джон ТИНДАЛЛ (1820 – 1893 гг.),

Профессор, Королевский институт Великобритании, Лондон

Тиндалл экспериментально исследовал свойства газов поглощать-испускать инфракрасное излучение. Он показал что азот (сод. 78%) и кислород (сод. 21%) – НЕ ОБЛАДАЮТ ЭТИМ СВОЙСТВОМ, а водяной пар, углекислый газ, метан - ОБЛАДАЮТ!

В публичной лекции 1863 г. «Об излучении через земную атмосферу» он высказал мысль о том, что в отсутствие ПОСЛЕДНИХ климат на поверхности Земли был бы значительно холоднее фактического (по современным оценкам – на 30°C холоднее!).

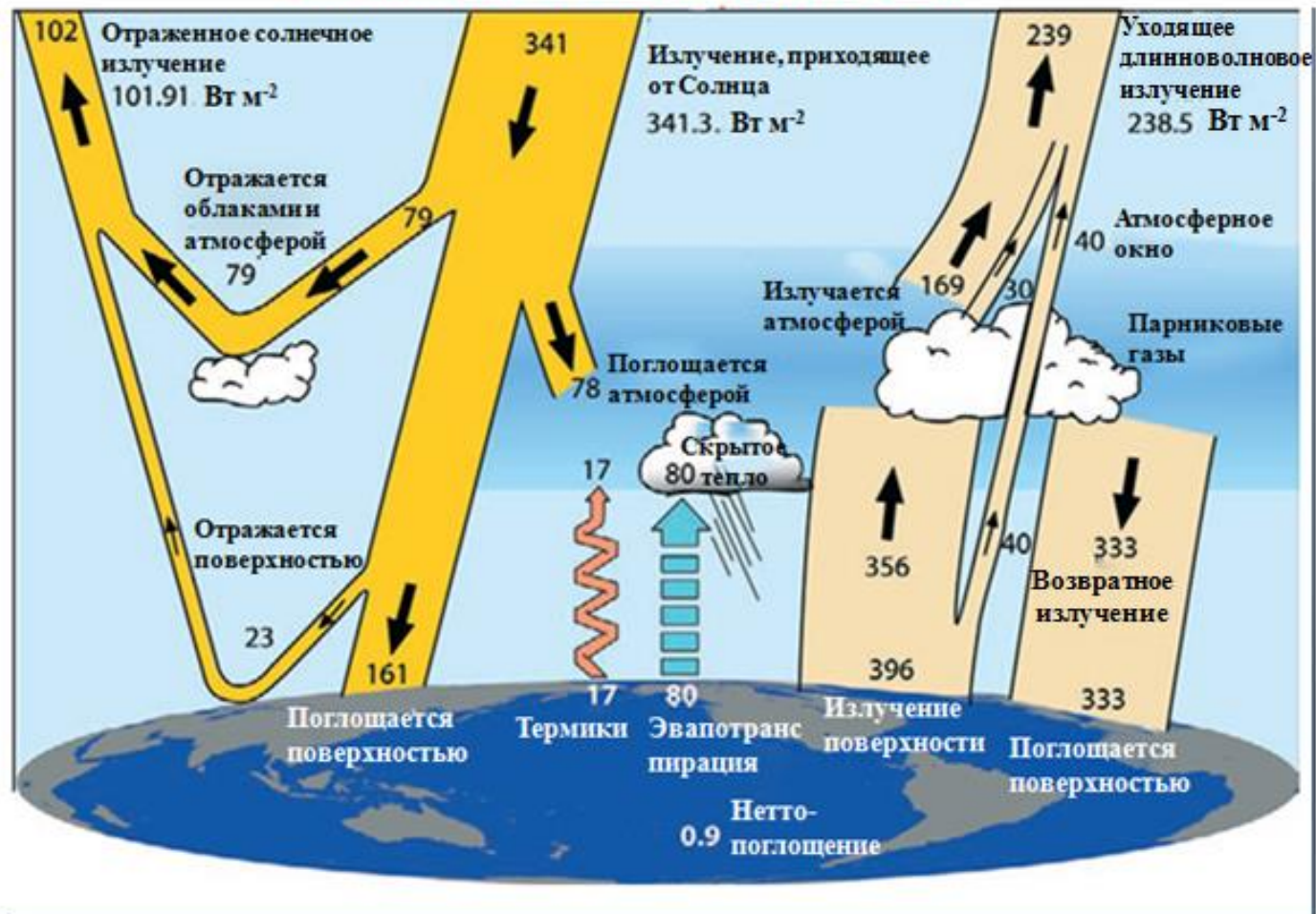
1872 г. Вклады в молекулярную физику в области радиационного тепла. XIII. Об излучении через земную атмосферу, стр. 421.

XIII.

ON RADIATION THROUGH THE EARTH'S ATMOSPHERE.*

Nobody ever obtained the idea of a line from Euclid's definition. The idea is obtained from a real physical line drawn by a pen or pencil, and therefore possessing width, the notion of width being afterwards dropped by a process of abstraction. So also with regard to physical phenomena: we conceive the invisible by means of proper images derived from the visible, and purify our conceptions afterwards. Definiteness of conception, even though at some expense to delicacy, is of the greatest utility in dealing with physical phenomena. Indeed it may be questioned whether a mind trained in physical research can at all enjoy peace without having made clear to itself some possible way of imaging those operations which lie beyond the boundaries of sense, and in which sensible phenomena originate.

Глобальные потоки энергии, Вт м⁻²



Потоки энергии (Вт м^{-2}) в системе «атмосфера + земная поверхность».
 Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J. 2009. Earth's global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, p. 311-323.

Геотермальный поток тепла (0.06 Вт/м^2) $\ll$ солнечного!
Атмосфера почти непрозрачна для инфракрасного излучения из-за парниковых газов.

К земной поверхности приходит поток коротковолнового излучения 184 Вт м^{-2} .

Часть его 23 Вт м^{-2} отражается земной поверхностью.

Таким образом, ее среднее альбедо равно 0.125.

На верхнюю границу атмосферы от Солнца приходит поток 341 Вт м^{-2} .

В отсутствие атмосферы и при сохранении этого значения альбедо земная поверхность поглощала бы $(1 - 0.125) \cdot 341 = 298.38 \text{ Вт м}^{-2}$. В состоянии радиационного равновесия столько же бы излучалось земной поверхностью в космос.

В настоящее время излучается 396 Вт м^{-2} , а средняя температура земной поверхности равна примерно **288 К (т.е. 15°C)**.

Тогда в отсутствие атмосферы в соответствии с законом Стефана-Больцмана температуру земной поверхности T можно найти из уравнения $298.38 / 396 = (T / 288)^4$, откуда **$T \approx 268 \text{ К}$** , что примерно на **20 градусов меньше** современной.

На самом деле было бы еще холоднее, поскольку при похолодании альбедо земной поверхности увеличивается.

Орас (Гораций) - Бенедикт де СОССЮР (*de Saussure*, 1740-1799) — швейцарский геолог, ботаник и альпинист. В 1762—1786 гг. - профессор натурфилософии в Женеве.

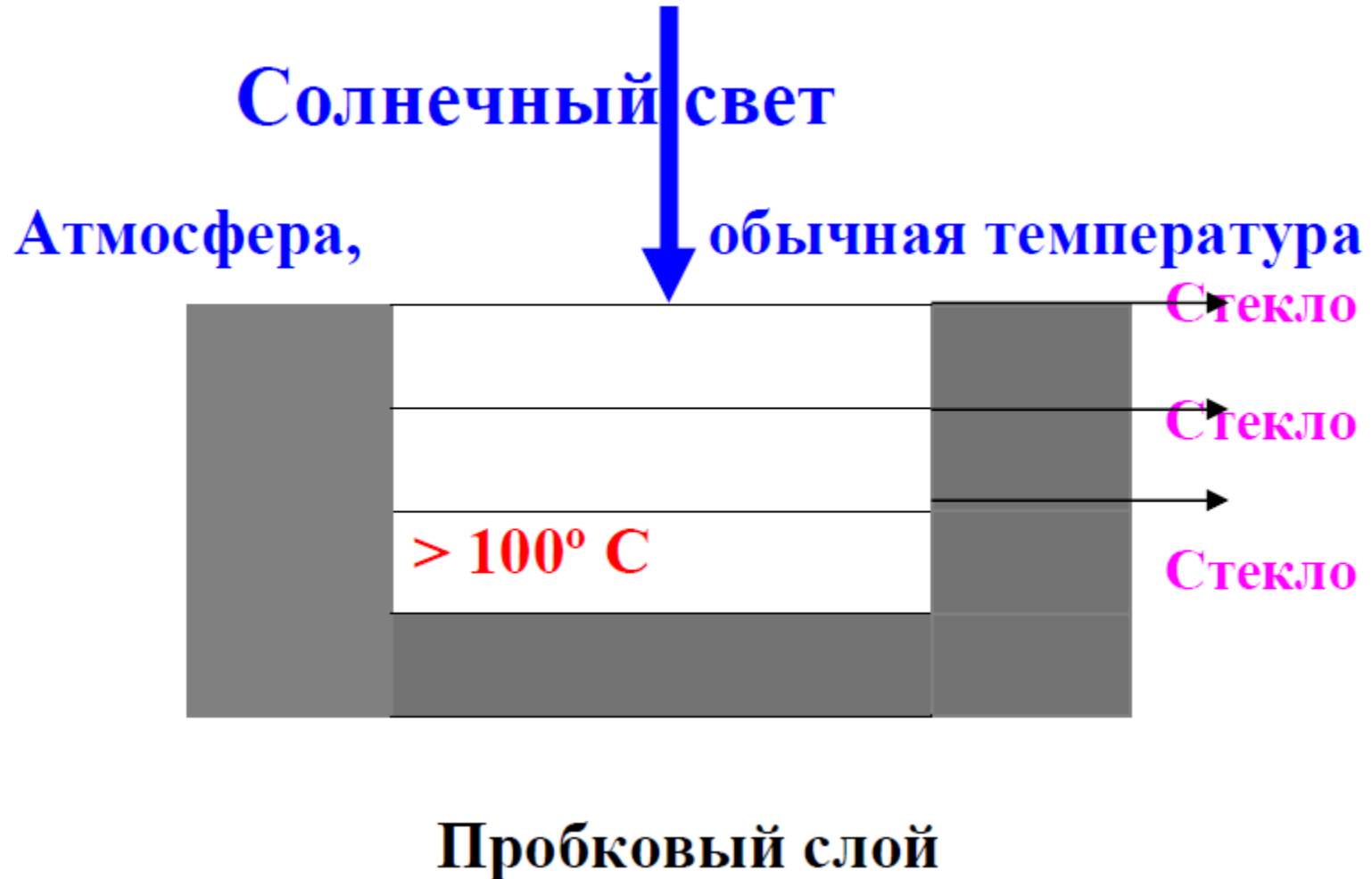


Saussure, from a picture by Juchl.

Де Соссюр сконструировал гелиотермометр – прибор для измерения интенсивности солнечного света через измерение температуры (которую уже умели измерять с помощью термометра). В 1770х годах де Соссюр выполнил ряд измерений на различных высотах в Альпах.

<http://www.eoearth.org/view/article/153530/>

Схема опыта де Соссюра, в котором проявился парниковый (тепличный) эффект, the greenhouse effect



Жан-Батист Жозеф ФУРЬЕ (*Jean-Baptiste Joseph Fourier*; 1768-1830), французский математик и физик.



Fourier, J.-B. J. *Joseph Fourier. Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France, t. VII, Paris, Didot; 1827*

Фурье Ж.-Б. Ж. Заметки о температуре Земного шара и межпланетного пространства. Бюллетень Королевской академии наук Французского института, т. 7. Париж, Дидо, 1827.

В ЭТОЙ РАБОТЕ ОН ВПЕРВЫЕ ПРЕДСКАЗАЛ И ТЕОРЕТИЧЕСКИ ОБЪЯСНИЛ ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ В АТМОСФЕРЕ!

Эти Заметки были ранее представлены в *Анналах химии и физики* (т. 27, стр. 136-167, 1824 г.) под заголовком «Общие замечания о температуре Земного шара и межпланетного пространства».

MÉMOIRE
SUR LES
TEMPÉRATURES DU GLOBE TERRESTRE
ET
DES ESPACES PLANÉTAIRES.

Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France,
t. VII, p. 570 à 604. Paris, Didot; 1827 (1).

La question des températures terrestres, l'une des plus importantes et des plus difficiles de toute la Philosophie naturelle, se compose d'éléments assez divers qui doivent être considérés sous un point de vue général. J'ai pensé qu'il serait utile de réunir dans un seul écrit les conséquences principales de cette théorie; les détails analytiques que l'on omet ici se trouvent pour la plupart dans les Ouvrages que j'ai déjà publiés. J'ai désiré surtout présenter aux physiciens, dans un tableau peu étendu, l'ensemble des phénomènes et les rapports mathématiques qu'ils ont entre eux.

La chaleur du globe terrestre dérive de trois sources qu'il est d'abord nécessaire de distinguer :

- 1° La Terre est échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats;
- 2° Elle participe à la température commune des espaces planétaires.

(1) Ce Mémoire a été aussi imprimé, avec de très légères modifications, dans les *Annales de Chimie et de Physique* (t. XXVII, p. 136 à 167; 1824) sous le titre suivant : *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires.* G. D.

Ж.-Б. Ж. ФУРЬЕ: «Трудно узнать в какой мере атмосфера воздействует на среднюю температуру планеты, математические теории в данном случае помочь не могут. Однако знаменитый путешественник г-н де Соссюр осуществил опыт, который, по всей видимости, способен прояснить этот вопрос.

Сосуд, накрытый одной или несколькими пластинками хорошо пропускающего свет стекла, выставляется на солнце. Пластинки находятся одна над другой, на некотором расстоянии друг от друга. Внутри сосуд покрывается толстым слоем пробковой коры, выкрашенной в черный цвет. Она способна получать и удерживать тепло. Согретый воздух содержится во всех частях – внутри сосуда и в каждой полости между пластинами. Термометры, помещенные в сосуде во всех полостях, показывают уровень тепла в каждой из них.

Прибор был выставлен на солнечный свет около полудня. При разных замерах зафиксированы температуры в сосуде (у дна), равные 70, 80, 100 и выше градусов по Реомюру (**87.5, 100, 125 и выше градусов по Цельсию**). Термометры, расположенные в промежутках между пластинами, показали более низкие значения температуры (чем у дна). Они понижались по мере удаления от дна сосуда к поверхностным полостям. (продолжение – след. слайд)

Если бы все (горизонтальные) слои воздуха, из которых состоит атмосфера, сохраняли бы свою плотность и прозрачность, но потеряли бы присущую им подвижность, эти твердые массы воздуха, экспонированные к солнечному излучению, создавали бы точно такой же эффект, как тот, что мы только что описали.

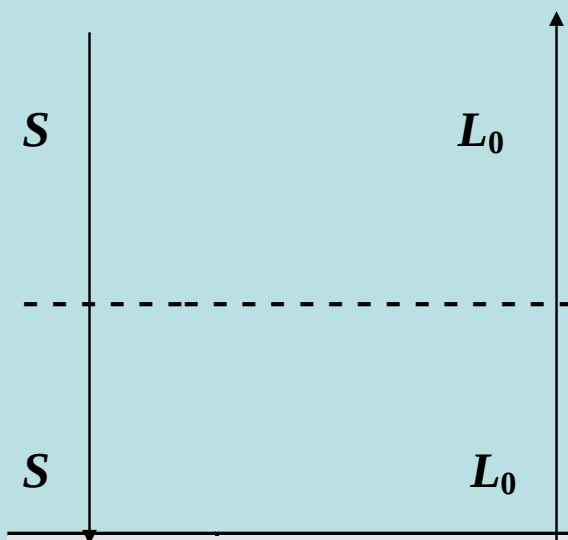
Тепло, приходящее к земной поверхности в виде света (*chaleur solaire*), сразу почти полностью потеряло бы бывшую у него способность проходить через полупрозрачные (светопроницаемые) твердые тела. Оно аккумулировалось бы в нижних слоях атмосферы, которые тем самым имели бы более высокую температуру. В то же время, по мере удаления от земной поверхности уровень тепла в слоях уменьшался бы.

Подвижность (реального) воздуха, быстро перемещающегося во всех направлениях и поднимающегося вверх при нагревании, и излучение «темного тепла» (*chaleur obscure*) в воздух **уменьшают интенсивность эффектов, которые имели бы место в твердой и прозрачной атмосфере, но не отменяют их. Понижение уровня тепла по мере удаления от земной поверхности не исчезает совсем.**

Таким образом (*резюме*) температура (земной поверхности) увеличивается вследствие наличия атмосферы потому, что поток тепла, проходящий через воздух, встречает меньшее препятствие при распространении в виде света, **чем когда оно распространяется в виде «темного» тепла.»**

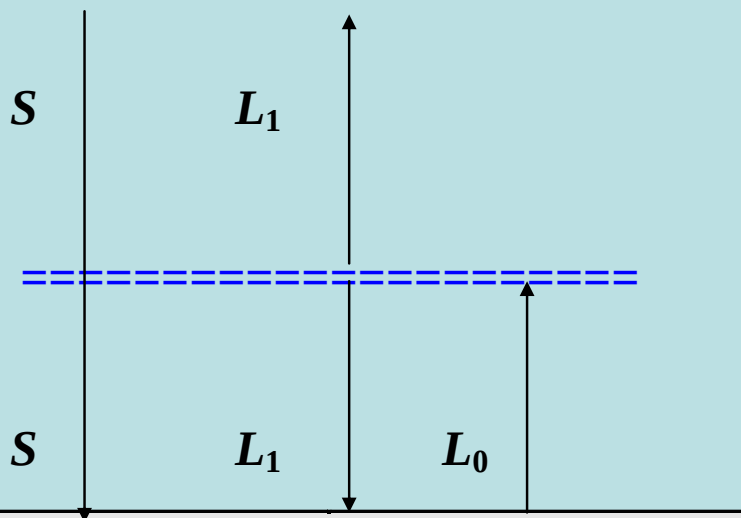
Иллюстративная модель с непрозрачной для ИФ излучения атмосферой. Поток лучистой энергии на Земле в состоянии термодинамического равновесия а) в отсутствие атмосферы и б) при наличии "тонкого слоя" атмосферы: S - поток солнечного, коротковолнового излучения; L_0 - поток энергии, излучаемой земной поверхностью в длинноволновом диапазоне; L_1 - потоки энергии, излучаемой атмосферой к поверхности Земли и в космос.

а)



Атмосфера

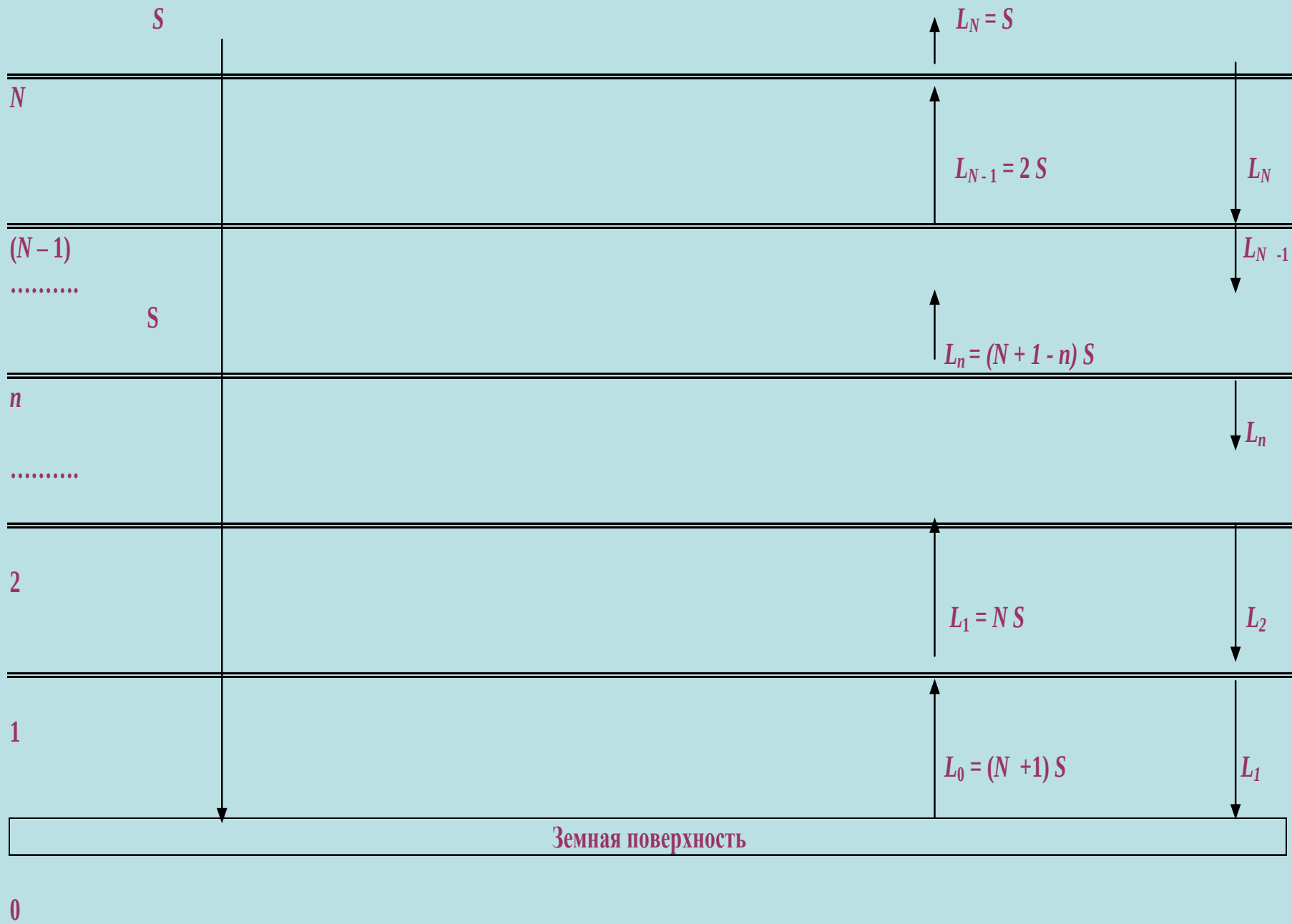
б)

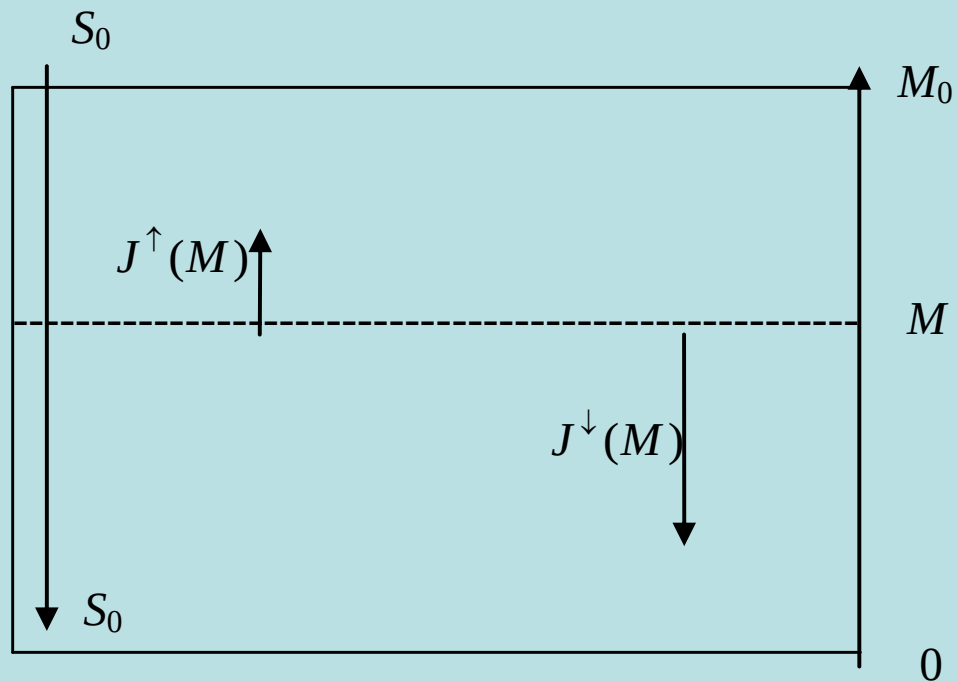


Земная поверхность

$$L_0 = S \quad [= \sigma T_0^4]$$

$$\begin{aligned} L_1 &= S \\ L_0 &= 2S \quad [= \sigma T_0^4] \end{aligned}$$



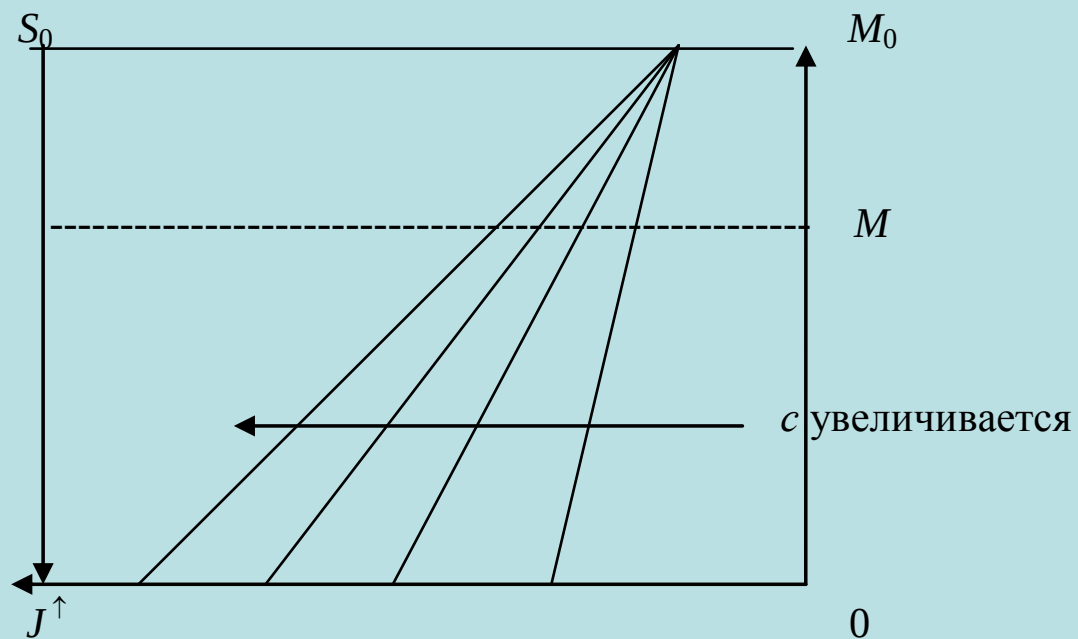


Земная поверхность

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

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

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



$$w = w_0 c$$

$$J^{\downarrow}(M) = 0.5 S_0 \int_M^{M_0} w(x) dx$$

$$J^{\downarrow}(M) = 0.5 S_0 w_0 c (M_0 - M)$$

$$J^{\uparrow}(M) = S_0 (1 + 0.5 \int_M^{M_0} w(x) dx)$$

$$J^{\uparrow}(M) = S_0 (1 + 0.5 w_0 c (M_0 - M))$$

$$tr_A = \exp(-w_0 c M_0)$$

$$\sigma T_0^4 = J^{\uparrow}(0) = S_0 (1 + 0.5 w_0 c M_0)$$

Парниковый эффект как явления 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.

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



АРРЕНИУС (Arrhenius) Сванте Август

(1859-1927 гг.),

лауреат Нобелевской
премии по химии 1903 г.

«как факт признания
особого значения его
теории
электролитической
диссоциации для
развития химии».

Это было продолжение его
докторской диссертации 1884 г.

**1896 г. : О влиянии углекислого газа в воздухе на
температуру земли.**

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS *.

I. *Introduction : Observations of Langley on Atmospheric Absorption.*

A GREAT deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon the climate. Tyndall † in particular has pointed out the enormous importance of this question. To him it was chiefly the diurnal and annual variations of the temperature that were lessened by this circumstance. Another side of the question, that has long attracted the attention of physicists, is this : Is the mean temperature of the ground in any way influenced by the



Академик Михаил Иванович БУДЫКО, 1920 – 2001 гг.

В 1971 г. М. И. Будыко высказал предположение о том, что в ближайшем будущем начнется глобальное потепление вследствие антропогенного обогащения атмосферы **углекислым газом**, которое в следующем веке достигнет нескольких градусов. Эта точка зрения была изложена им в брошюре „Влияние человека на климат“ (1972).

СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ 2011-2015 гг.: расчетная радиационная модель для реальной атмосферы (Семенов, Попов, 2011-2015)

1. Горизонтально-однородная атмосфера: в модели это 10 000 горизонтальных слоев одинаковой массы над 1 м² земной поверхности.
2. Состав горизонтальных атмосферных слоев соответствует стандартной атмосфере US Standard Atmosphere, характеризующий ситуацию примерно 1970х годов.
3. Энергия передается только излучением вверх или вниз
4. Каждый горизонтальный слой в системе 'атмосфера+земная поверхность' находится в состоянии равновесия – сколько поглощает лучистой энергии, столько и излучает.
5. Потoki лучистой энергии в модели представлены излучением в 410 спектральных интервалах:

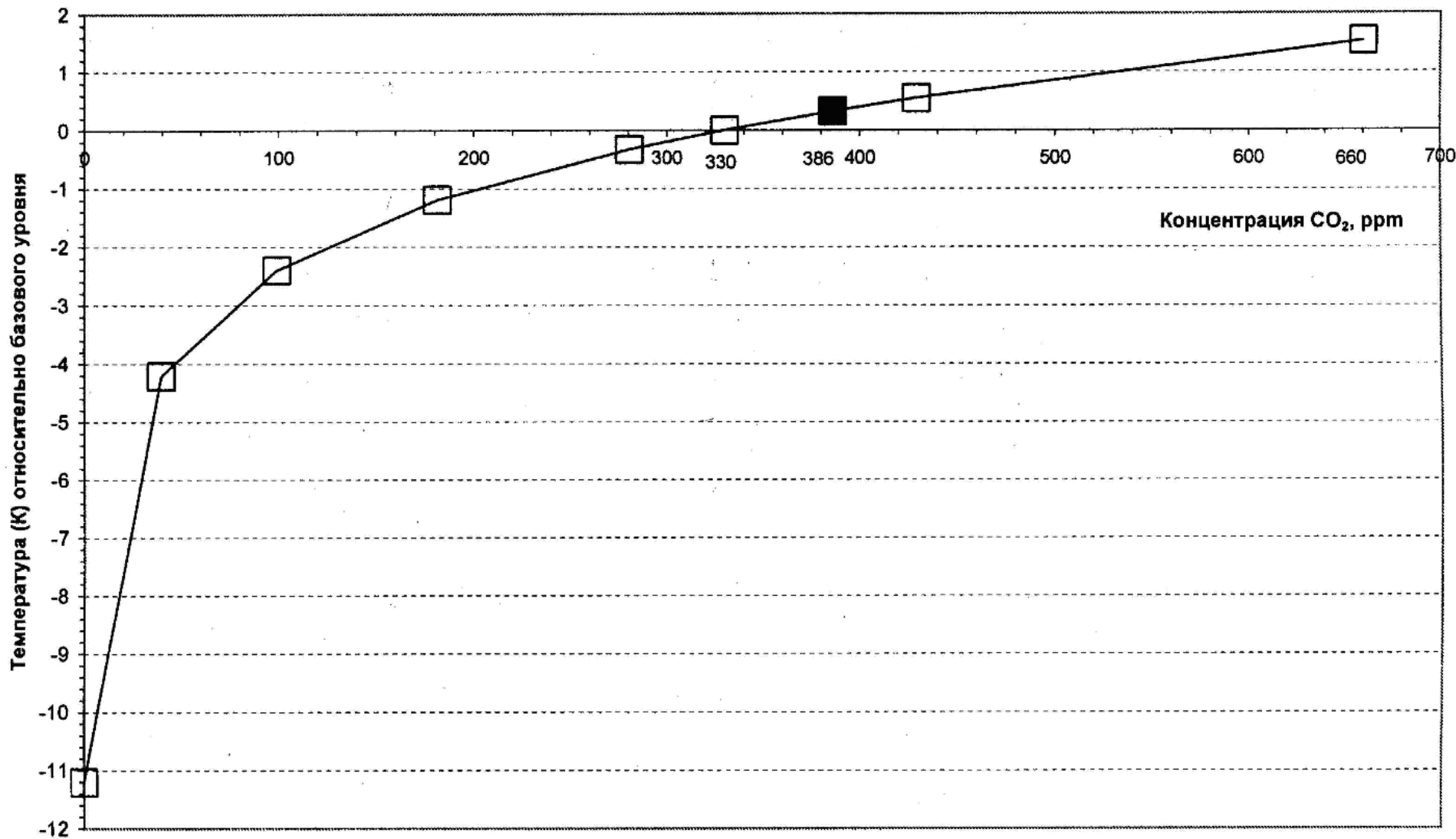
Границы первых 13 из них в мкм: 0,1975 – 0,2075; 0,2075 - 0,2175; 0,2175 - 0,2275; 0,2275 - 0,2375; 0,2375 - 0,2475; 0,2475 - 0,2575; 0,2575 - 0,2675; 0,2675- 0,2775; 0,2775 - 0,2875; 0,2875 - 0,2975; 0,2975 – 0,3125; 0,3125 – 0,45; 0,45 – 0,75. Остальные 397 имеют одинаковую ширину 0,25 мкм: от 0,75 – 1,0 до 99,75 – 100,0 мкм.

Учтенные в модели радиационно-активные газы: O_2 , H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , NO_2 .

Значения коэффициентов (сечений) поглощения, $cm^2/молек$:

- для первых 13 спектральных интервалов из работы И.Л. Кароля с соавторами (1986);
- для остальных 397 спектральных интервалов оценивались с использованием спектроскопической базы данных HITRAN (high-resolution transmission molecular absorption database) в версии 2008 г.

Расчетный алгоритм: имитировал реальный процесс становления равновесия по излучению; временной шаг – 150 с; полное время расчета соответствовало примерно 0,5 года (109700 итераций).

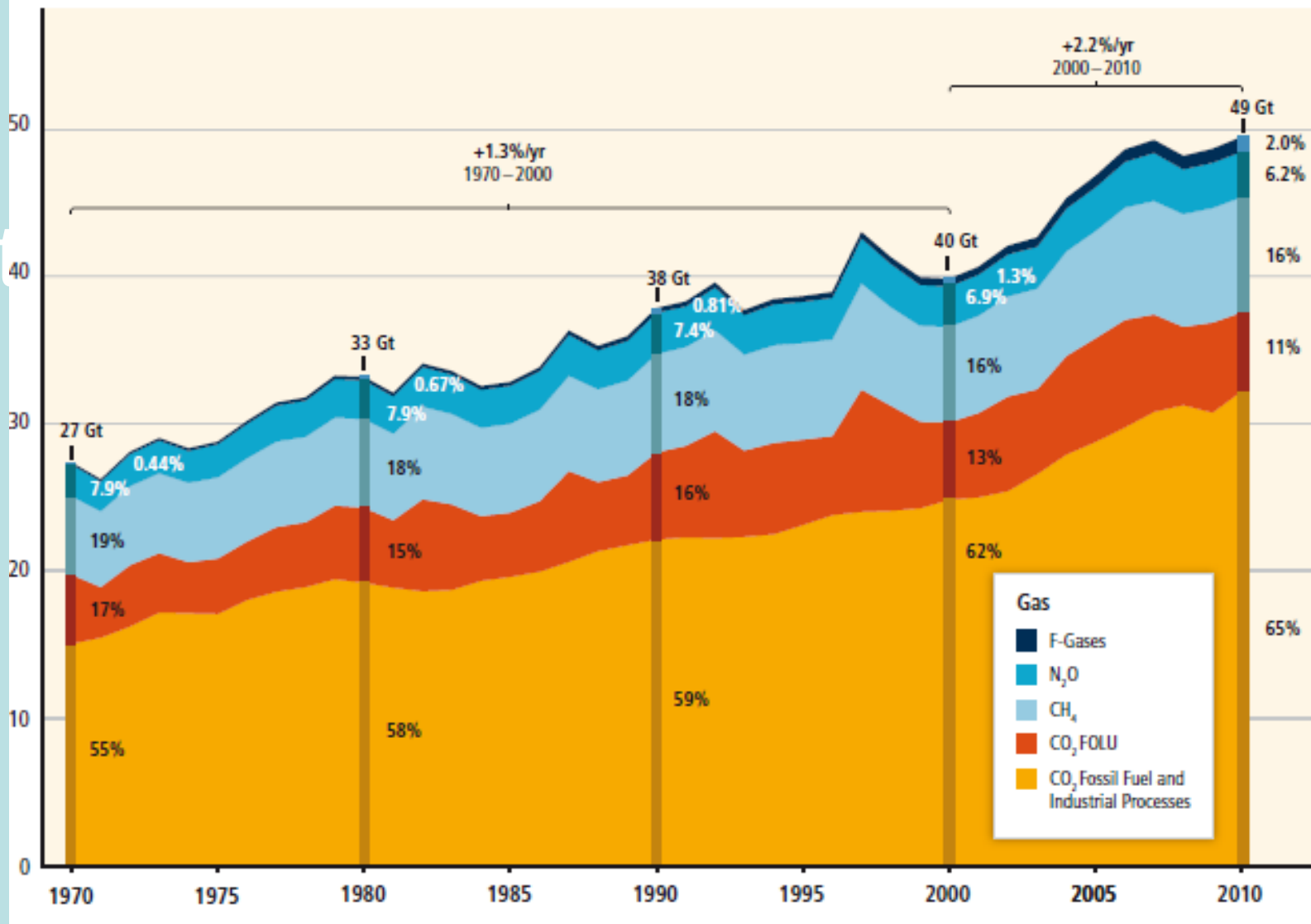


Зависимость радиационно-равновесной температуры (К) земной поверхности от концентрации CO₂, полученная с помощью спектральной радиационной модели, использующей современные спектроскопические данные; нуль соответствует значению в 1970 г.

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

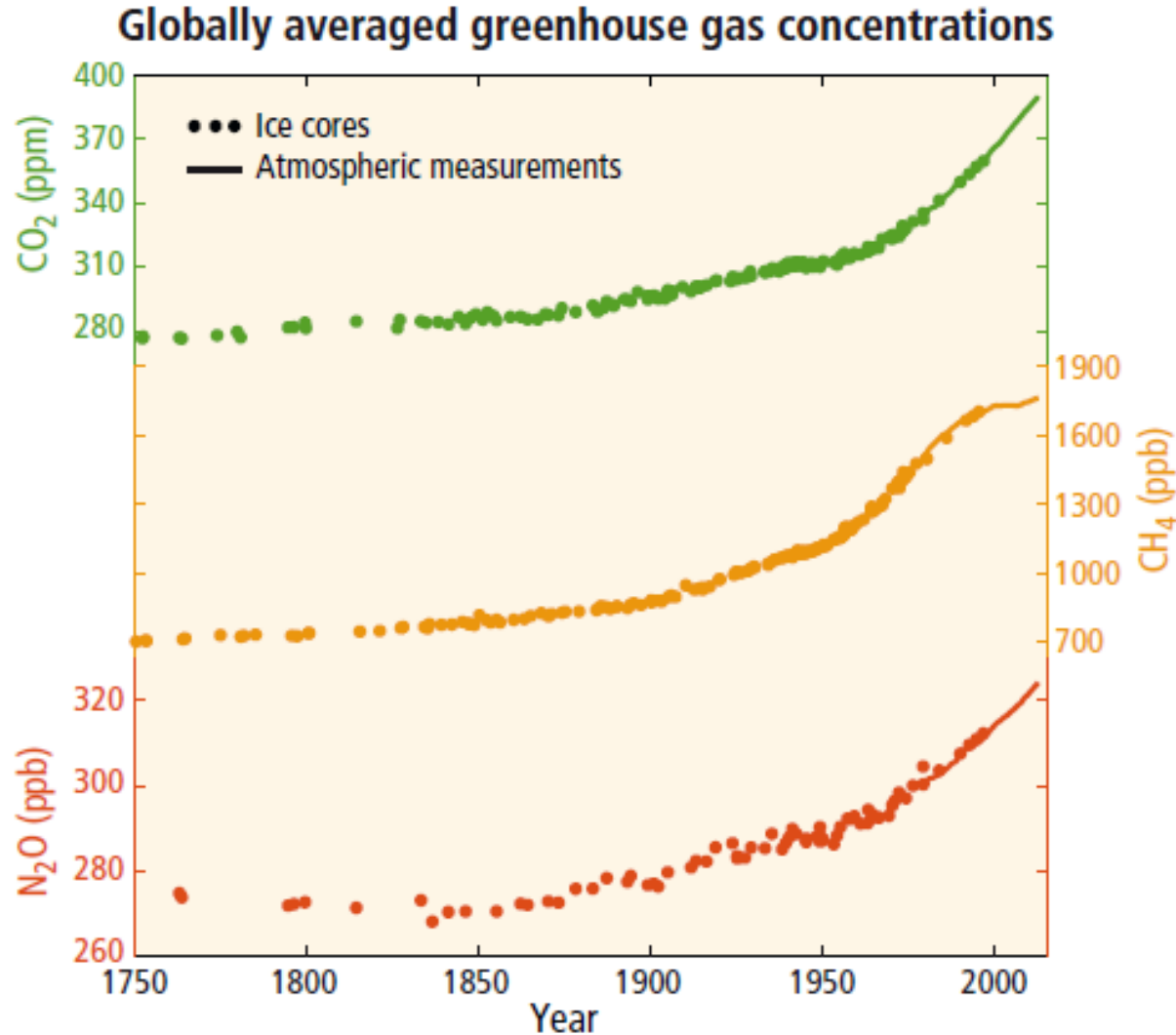
Газ	с* , ppm	$\Delta T / \Delta c$ (K/ppm)	ΔT при (с* x 10), K
H₂O	7750	0.001	-
CO₂	330	0.006 – 0.007	7.9
CH₄	1.7	0.08 - 0.09	0.8
N₂O	0.32	0.7 - 0.9	1.3

GHG Emissions [GtCO₂ eq/yr]



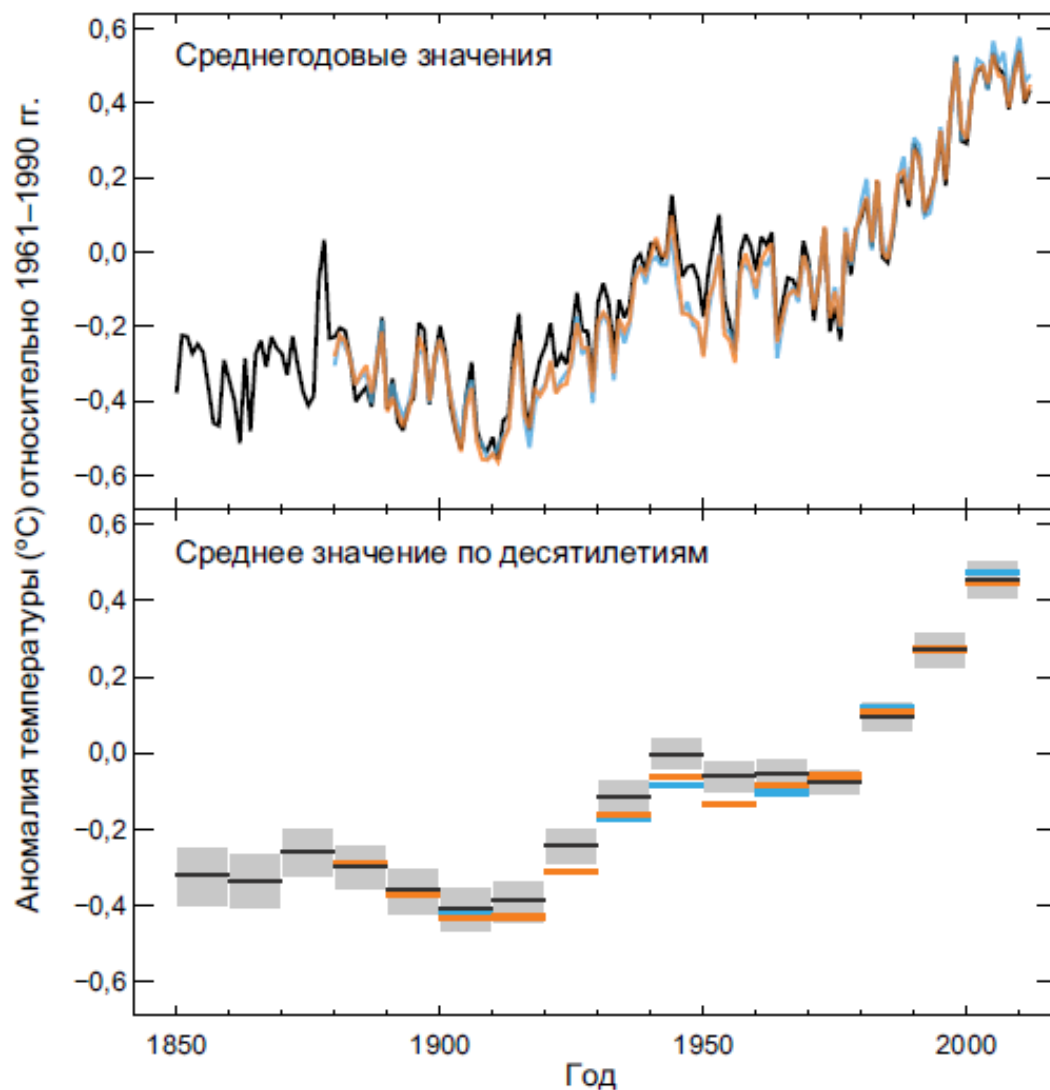
Новый фактор изменения глобального климата: Глобальная годовая антропогенная эмиссия парниковых газов по группам газов в 1970 – 2010 гг. (AR5 WGIII SPM)

Средние глобальные концентрации



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

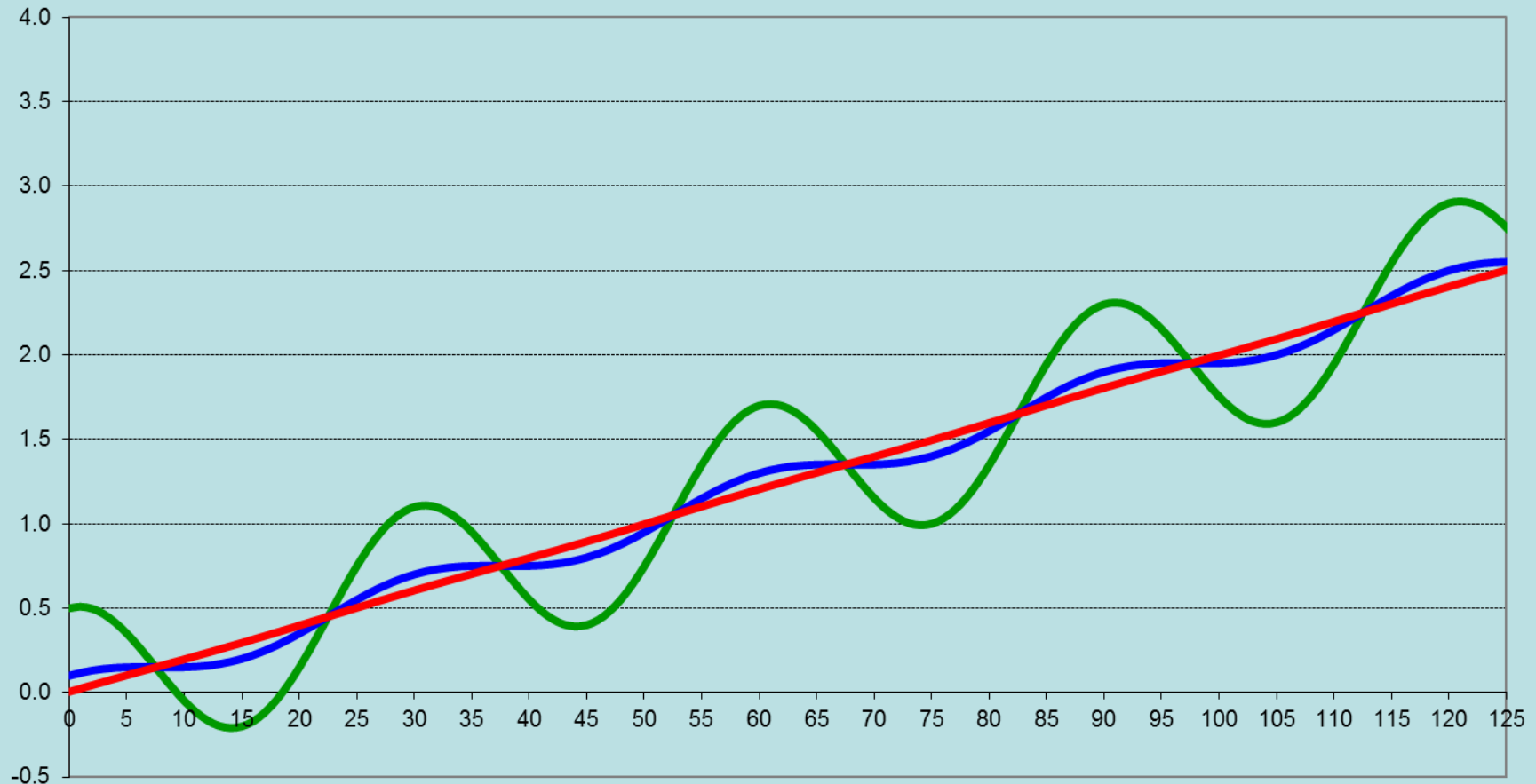
Вещество	Размер- ность	Фор- мула	Концен- трация в 1750 г.	Концен- трация в 1998 г.	Темп изменения концентрации	
					1750- 1998 гг. *)	1990е годы
Водяной пар	ppm	H₂O	-	7750	-	-
Диоксид углерода	ppm	CO ₂	280	367	0,4	1,6
Метан	ppb	CH ₄	700	1745	4,2	7,0
Закись азота	ppb	N ₂ O	270	314	0,2	0,8
Тетрафторметан	ppt	CF ₄	40	80	0,2	1,0
Гексафторэтан	ppt	C ₂ F ₆	0	3,0	0,01	0,08
Гексафторид серы	ppt	SF ₆	0	4,2	0,02	0,24
HFC- 23	ppt	CHF ₃	0	14	0,06	0,55
HFC-134a	ppt	CF ₃ CH ₂ F	0	7,5	0,03	2,0
HFC-152a	ppt	CH ₃ CHF ₂	0	0,5	0,002	0,1 ¹



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).

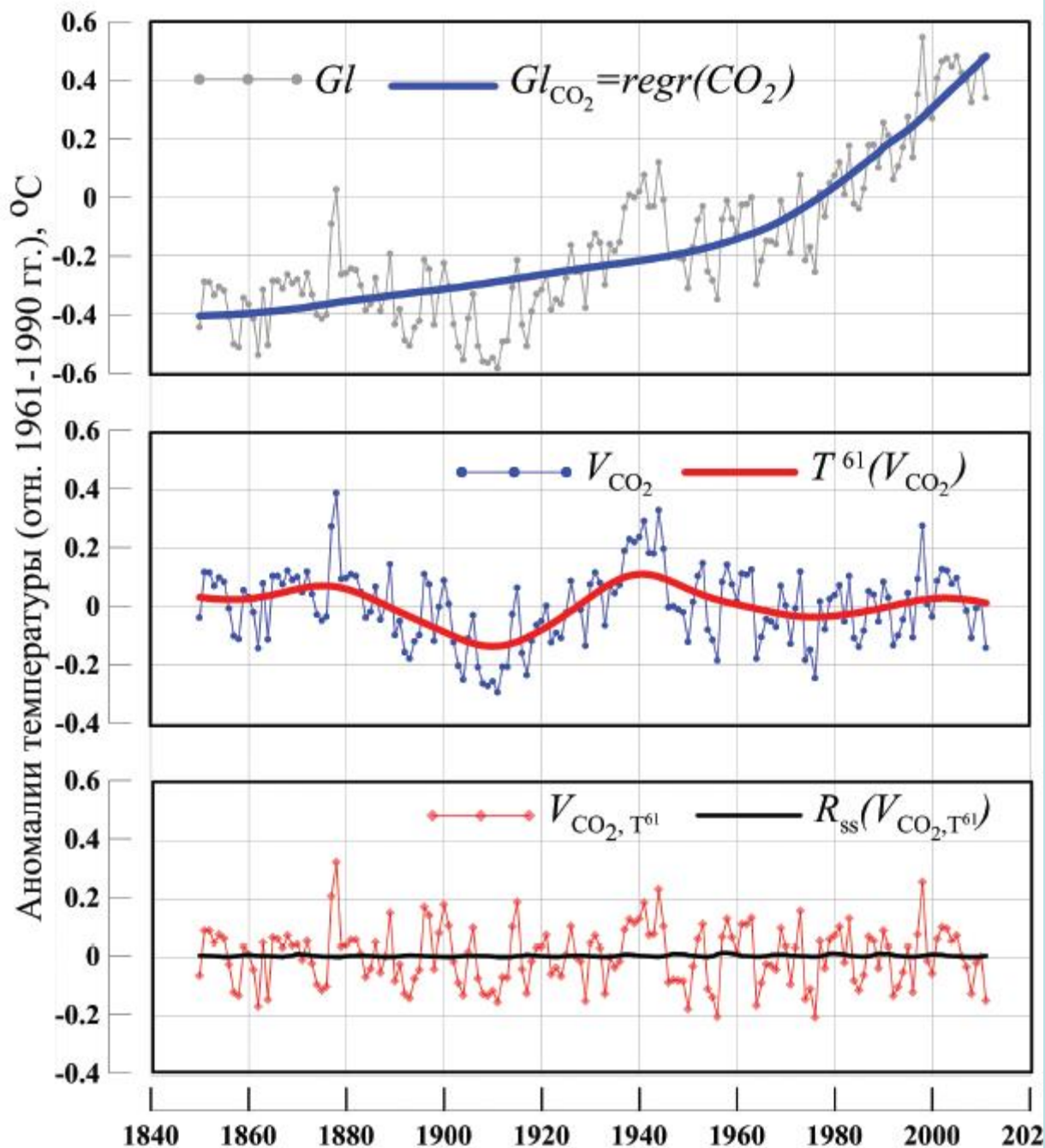
Изменение средней глобальной приземной температуры воздуха (аномалии vs. 1961-1990 гг.)

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



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

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



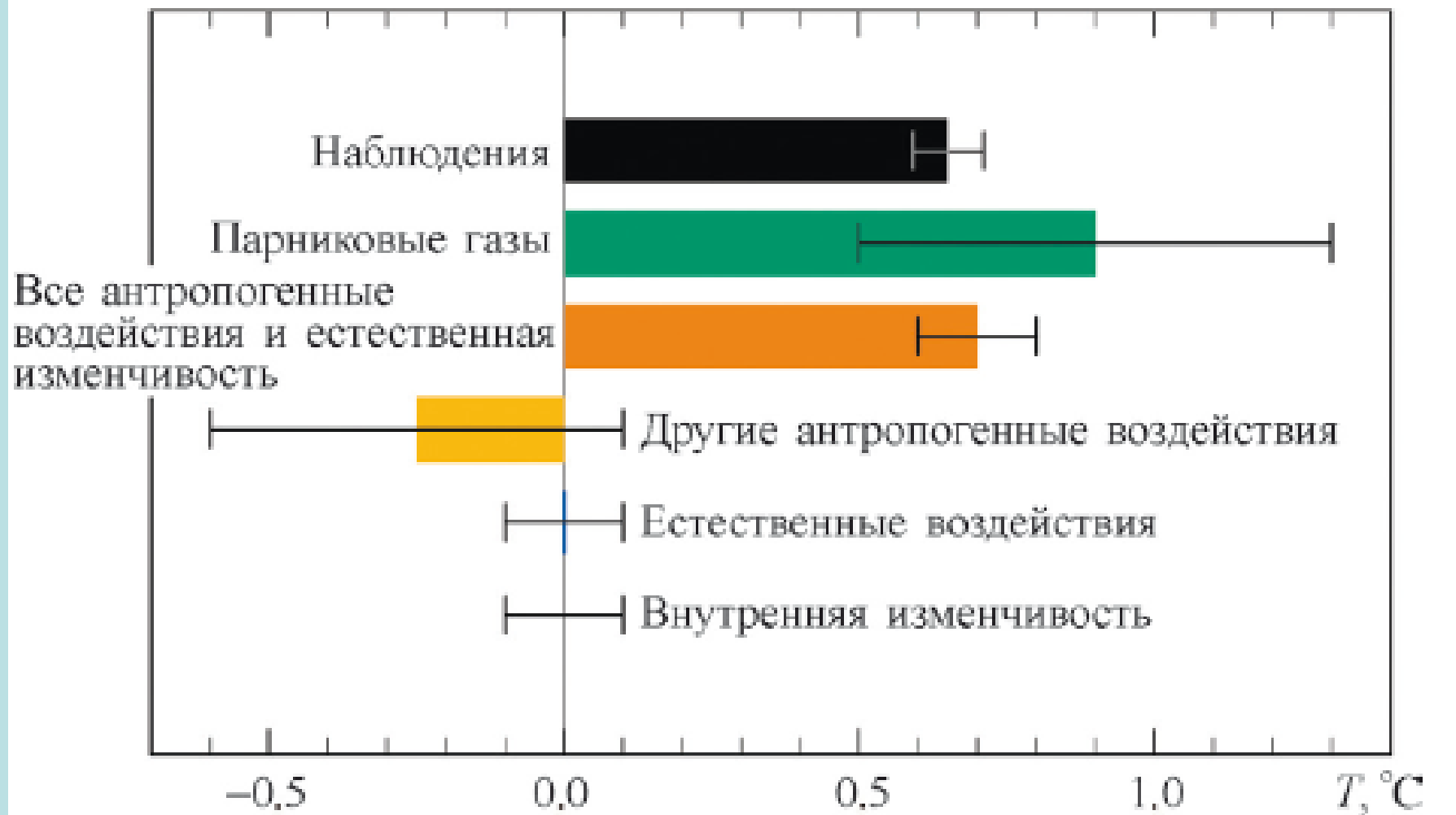
Груза Г.В., Ранькова Э.Я.
(2012)

Вверху: ход глобальной температуры (Gl) и кривая ее регрессии на CO_2 (Gl_{CO_2}).

В центре: ход остатков от регрессии ($V_{CO_2} = Gl - Gl_{CO_2}$) и ее низкочастотная составляющая ($T_{61} V_{CO_2}$).

Внизу: ход $V_{CO_2, T_{61}}$ (остатки после исключения обеих компонент: регрессия на CO_2 и T_{61}) и кривая ее регрессии на число солнечных пятен SS .

Аттрибуция?



Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада разных факторов в линейный тренд наблюдавшегося глобального потепления в 1951—2010 гг. (AR5 SYR). Значение тренда по данным архива HadCRUT4 показана черным цветом вместе с 5—95%-ным доверительным интервалом, учитывающим неопределенности в этом архиве.

АТТРИБУЦИЯ НАБЛЮДАЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: РАСЧЕТНЫЙ ПОДХОД

F1. Светимость Солнца

F2. Параметры земной орбиты

F3. Космические лучи

F4. Выбросы аэрозолей вулканами

F5. Антропогенные выбросы парниковых газов

F6. Антропогенные выбросы аэрозолей

F7. Антропогенные изменения альбедо
Земной поверхности

(другие факторы)

Расчетная

модель

$\Delta T =$

$a_1 \Delta F_1 +$

$a_2 \Delta F_2 +$

$a_3 \Delta F_3 +$

$a_4 \Delta F_4 +$

$a_5 \Delta F_5 +$

$a_6 \Delta F_6 +$

$a_7 \Delta F_7$

.....

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В формировании базового, естественного парникового эффекта основную роль играют водяной пар H_2O и углекислый газ CO_2 .

Рост концентрации углекислого газа - главная причина антропогенного усиления парникового эффекта. Метан и закись азота имеют меньшее значение.

Потенциал CO_2 , CH_4 и N_2O в отношении усиления парникового эффекта был значительным и остается заметным.

Дальнейший рост концентрации CO_2 будет иметь заметно все меньшее значение в аспекте усиления парникового эффекта.

При увеличении содержания парниковых газов действие естественных факторов (пока не полностью изученных) может временно компенсировать потепление и даже привести к временному похолоданию (что уже наблюдалось в XX веке и начале XXI века).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

