

## ФРЕОНЫ И КЛИМАТ ЗЕМЛИ

Доктор физ.-мат. наук И.К.Ларин

**После преодоления озонового кризиса конца XX века потепление климата по-видимому станет основной глобальной экологической проблемой XXI века, порождённой деятельностью человека.**

*В XX веке появились признаки изменения климата. Во всяком случае последнее столетие миллениума оказалось самым тёплым в тысячелетии. Реконструкция климата в течение этого периода и данные измерений показали, что за последние 100 лет температура увеличилась на  $0,6 \pm 0,2$  градуса, тогда как за предыдущие 900 лет она в среднем упала только на 0,2 градуса. Анализ этих изменений с помощью различных математических моделей позволил с достаточно большой долей уверенности утверждать, что наблюдаемое за последние сто лет глобальное потепление обусловлено главным образом действием антропогенных факторов – ростом эмиссии углекислого газа и других парниковых газов.*

*Помимо роста приземной температуры появились и другие признаки глобального потепления. Такие, как таяние арктических льдов, разрушение шельфового льда Антарктики, уменьшение ледяного щита Гренландии, который за последние пять лет сократился на 250 кубических километров. Важным признаком изменения климата является обнаруженное уменьшение температуры на 5 градусов в стратосфере (на высоте 50 км) и на 30 градусов в мезосфере (на высоте 70 км). Здесь нужно пояснить, что в этих областях атмосферы парниковый эффект не увеличивает, а уменьшает температуру.*

*Всё это говорит о том, что сегодня проблема глобального потепления выходит на первое место, оттеснив проблему сохранения озонового слоя на второй план. В самой же проблеме потепления центральным вопросом, вокруг которого сегодня идут горячие споры, является вопрос о его причинах. Хотя предмет этого спора и важен, но ещё более важным является вопрос о том, как будет изменяться климат в будущем.*

*Для работников холодильной промышленности этот вопрос имеет особое значение, поскольку “создание” холода в условиях глобального потепления неизбежно потребует новых, значительных затрат. В то же время сама холодильная промышленность, используя хладагенты, обладающие парниковыми свойствами, будет способствовать потеплению климата. Поэтому важно понять, во-первых, почему*

*и в какой степени может измениться температура земной поверхности, и, во-вторых, в какой мере использование фреонов как хладагентов может повлиять на этот процесс.*

*Анализу этих вопросов и посвящена настоящая статья.*

Чтобы разобраться в причинах возможного глобального потепления, необходимо рассмотреть природу парникового эффекта, которому большинство климатологов приписывают определяющую роль в формировании климата. Но прежде всего нужно подчеркнуть, что в настоящее время доля естественного парникового эффекта составляет более 99% и определяется в значительной мере парниковым эффектом паров воды. Вклад антропогенных парниковых газов за последние 150 лет (т.е. в индустриальную эпоху) составил менее 1%. Поэтому нужно понимать, что когда говорят о парниковом эффекте, то имеется в виду не абсолютная его величина, а её изменение, начиная с 1%. Правда, изменение может быть весьма существенным, поскольку мировое хозяйство сегодня развивается совсем другими темпами, чем сто лет назад, и антропогенный вклад в изменение климата может быстро увеличиваться.

Теперь собственно о парниковом эффекте.

Для условий Земли без атмосферы радиационный баланс в системе Земля-космос определяется равенством потоков приходящего коротковолнового солнечного излучения и уходящего длинноволнового излучения с поверхности Земли. Температуру земной поверхности в этом случае можно рассчитать с помощью уравнения радиационного баланса (1)

$$\frac{1}{4} S_0 (1 - \alpha) = \delta \sigma T^4 \quad (1)$$

Здесь  $S_0$  – солнечная постоянная, т.е. поток солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы и равный  $1368 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ,  $\alpha$  - среднее альbedo системы Земля-атмосфера (0,31),  $\delta$  - коэффициент отличия земной поверхности от свойств чёрного тела (0,98),  $\sigma$  - постоянная Стефана – Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ ) [11]. Подставив все значения параметров в (1), мы получим  $T = 255 \text{ К}$ . Особенностью этой величины является то, что с одной стороны она определяет температуру нашей планеты как космического тела, а с другой стороны является “нулевой” отметкой для расчёта величины парникового эффекта в градусах, который в настоящее время составляет 33 К.

При появлении земной атмосферы и парниковых компонент, способных поглощать тепловое излучение Земли, ситуация меняется. Теперь только часть солнечного излучения

достигает земной поверхности, а другая часть отражается атмосферой назад, в космос. Земное длинноволновое излучение также частично задерживается парниковыми газами, которые переизлучают половину поглощённого тепла назад, к Земле, а вторую половину – в космос. В этих условиях Земля получает больше тепла, чем в отсутствии атмосферы, что приводит к повышению её температуры, которая сегодня равна 288 К или +15 °С (имеется в виду среднеглобальная, среднесезонная величина).

Общая картина распределения коротковолнового и длинноволнового излучения в сегодняшней земной атмосфере показана на рис.1.

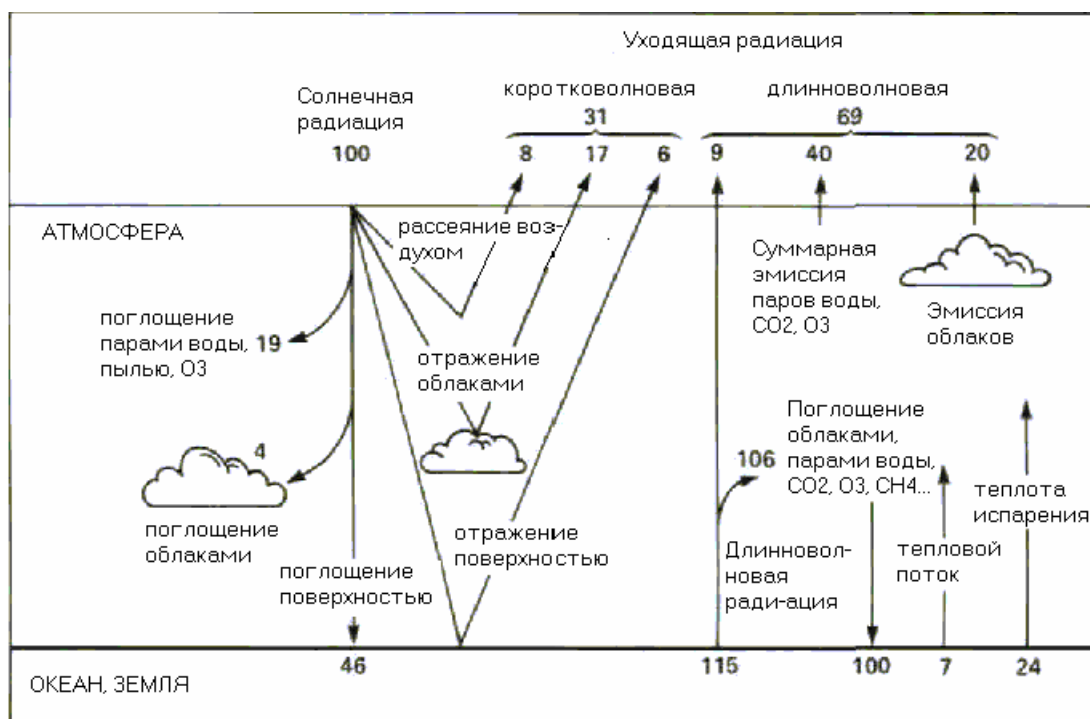


Рис.1. Распределение потоков длинноволнового и коротковолнового излучения в земной атмосфере в условных единицах. 100 единиц (или 100% приходящего излучения) соответствуют потоку в 342 Вт×м<sup>-2</sup>.

Можно видеть, что 46% солнечного излучения достигают земной поверхности и нагревают её. В результате возникает направленный вверх поток инфракрасного (ИК) излучения с поверхности Земли. Часть этого потока поглощается парниковыми газами атмосферы и возвращается назад. В результате на земную поверхность поступает 146% первичного потока, т.е. почти в полтора раза больше того, что приходит от Солнца на верхнюю границу атмосферы. Земной поток излучения становится больше и в конце концов устанавливается баланс потоков тепла, приходящих и уходящих с поверхности; на верхней границе атмосферы поток приходящего солнечного излучения оказывается равным потоку излучения, уходящему из системы Земля-атмосфера. Из данных,

приведенных на рис.1, можно видеть, что этот баланс обеспечивается на 31% коротковолновым излучением и на 69% длинноволновым излучением.

Ситуация равенства потоков излучения характерна для сегодняшнего содержания парниковых газов в атмосфере (имеются в виду пары воды,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , хлорфторуглероды и  $\text{O}_3$ ). При изменении содержания парниковых газов, радиационный баланс на земной поверхности будет нарушаться и для его восстановления потребуется повышение температуры земной поверхности на величину  $\Delta T_S$ . Принимают, что  $\Delta T_S$  линейным образом связано с изменением радиационного баланса  $\Delta F_R = F_{in} - F_{out}$ , который ещё называют радиационным форсингом, т.е.

$$\Delta T_S = \lambda_C \cdot \Delta F_R, \quad (2)$$

где  $\lambda_C = 0,3 \div 1,1 \text{ К}/(\text{Вт} \times \text{м}^{-2})$ , а  $F_{in}$  и  $F_{out}$  - потоки излучения, приходящие и уходящие с земной поверхности. Кстати, термин форсинг происходит от английского forcing – принуждение, стимуляция, что достаточно точно характеризует природу парникового эффекта: появление отличного от нуля радиационного форсинга принуждает земную поверхность повысить свою температуру.

Из формулы (2) следует, что если мы найдём связь  $\Delta F_{Ri}$  с концентрацией парниковой компоненты,  $C_i$ , и будем знать, как изменяются концентрации  $C_i$  со временем, мы сможем оценить и будущее изменение температуры земной поверхности.

Искомая связь определяется тремя факторами:

- 1) эффективностью поглощения инфракрасного (ИК) излучения данной компонентой (или, иначе, сечением поглощения);
- 2) положением полосы поглощения по отношению к ИК-спектру излучения земной поверхности, имеющему форму симметричного колокола с максимумом в районе 10 мкм (чем ближе к максимуму излучения будет поглощать данная компонента, тем в принципе больше будет её парниковый эффект);
- 3) уже имеющимся количеством данной компоненты в атмосфере или, иначе её оптической толщиной (если атмосферная концентрация компоненты велика и она поглотила почти всё излучение в том диапазоне длин волн, где она поглощает, то дальнейший рост её концентрации мало что изменит).

Для расчета радиационного форсинга  $\Delta F_{Ri}$   $i$ -ой парниковой компоненты использовался конкретный тип зависимости форсинга от  $C_i$ . Нужно сказать, что если концентрация парникового газа в атмосфере мала, то увеличение его количества будет

приводить к линейному росту радиационного форсинга, как это имеет место в случае озона и фреонов, которых в атмосфере относительно мало. При очень большой величине оптической плотности (соответствующей очень большому атмосферному содержанию данной компоненты) влияние концентрации ослабевает и возникает логарифмическая зависимость от концентрации, как это имеет место в случае CO<sub>2</sub>. В промежуточном случае (закись азота, метан) радиационный форсинг имеет корневую зависимость от концентрации. Модель Кейла–Диккенсона даёт простые зависимости для индивидуальных значений радиационного форсинга. Так, для закиси азота и метана справедливо соотношение:

$$\Delta F_{Ri} \sim (\sqrt{C_i} - \sqrt{C_{0i}}), \quad (3)$$

где  $C_i$  – текущая, а  $C_{0i}$  – начальная концентрация  $i$ -ой компоненты.

Для углекислого газа –

$$\Delta F_{Ri} \sim \ln \left( \frac{C_i}{C_{0i}} \right). \quad (4)$$

Для озона и остальных газов справедливо выражение

$$\Delta F_{Ri} \sim (C_i - C_{0i}). \quad (5)$$

Коэффициенты пропорциональности для расчета радиационного форсинга по соотношениям (3) - (5) приведены в Табл. 1.

Таблица I.

Коэффициенты пропорциональности для расчета радиационного форсинга по соотношениям (3)–(5)

Газ	Единица	Значение	Газ	Единица	Значение
CFC-11	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0,22	HCFC-22	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0.19
CFC-12	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0,28	HCFC-123	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0.18
CFC-113	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0,28	HCFC-124	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0.19
CFC-114	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0,32	HCFC-141b	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0.14
CFC-115	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0,26	HCFC-142b	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0.18
HFC-32	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	0,10	CO <sub>2</sub>	$\frac{Вт}{м^2 ppbv}$	7.6

HFC-125	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.24	N <sub>2</sub> O	$\frac{Bm}{m^2 \sqrt{ppbv}}$	0.131
HFC-134a	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.17	CH <sub>4</sub>	$\frac{Bm}{m^2 \sqrt{ppbv}}$	0.031
HFC-143	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.14	CCl <sub>4</sub>	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.10
HFC-152	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.12	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.05
O <sub>3</sub>	$\frac{Bm}{m^2 ppbv}$	0.02			

Теперь нам достаточно узнать, как будет меняться содержание парниковых компонент (в единицах ppbv, т.е. в миллиардных долях), и мы сможем судить о глобальном потеплении.

С этой целью можно воспользоваться сценариями эмиссий парниковых газов на 2000-2100 годы, разработанными Межправительственным комитетом по изменению климата (IPCC – International Panel on Climate Change). Всего было разработано четыре таких сценария (A1, A2, B1, B2), которые в разной мере учитывают будущие меры по регулированию выбросов парниковых газов, причём в сценарии A2 такие меры вообще не принимаются во внимание, а в сценарии B1 они предусматриваются в максимальной степени. Используя эти данные и фотохимическую модель средней атмосферы, разработанную в Институте энергетических проблем химической физики РАН, мы рассчитали изменение концентраций всех парниковых газов на протяжении 2000-2100 годов и на этой основе описанным выше методом рассчитали возможное изменение температуры в ближайшие сто лет по четырём сценариям IPCC. Эти результаты показаны на рис. 2.

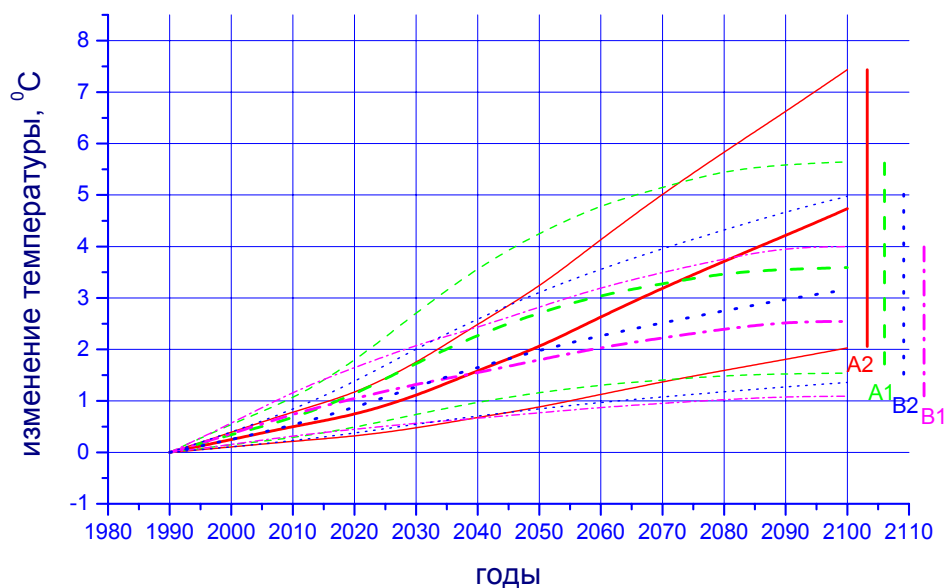


Рис.2. Изменение температуры в 2000-2100 годы, рассчитанное по четырём сценариям Межправительственного Комитета по Изменению Климата A1, A2, B1 и B2. Жирными цветными линиями показаны средние значения для каждого сценария, а тонкими кривыми – диапазон изменений, обусловленный диапазоном изменений коэффициента  $\lambda_C$  в формуле (2).

Можно видеть, что по всем сценариям ожидается повышение температуры земной поверхности, причём максимальный диапазон изменений температуры за сто лет составляет от +1,1 до +7,4 °C, а диапазон изменений средних значений – от +2,5 до 4,7 °C.

На следующих рисунках показано изменение парниковых эффектов (в виде изменения радиационного форсинга) на протяжении XXI века разных групп парниковых газов и разных индивидуальных веществ для сценария A2 (т.е. для сценария без мер регулирования).

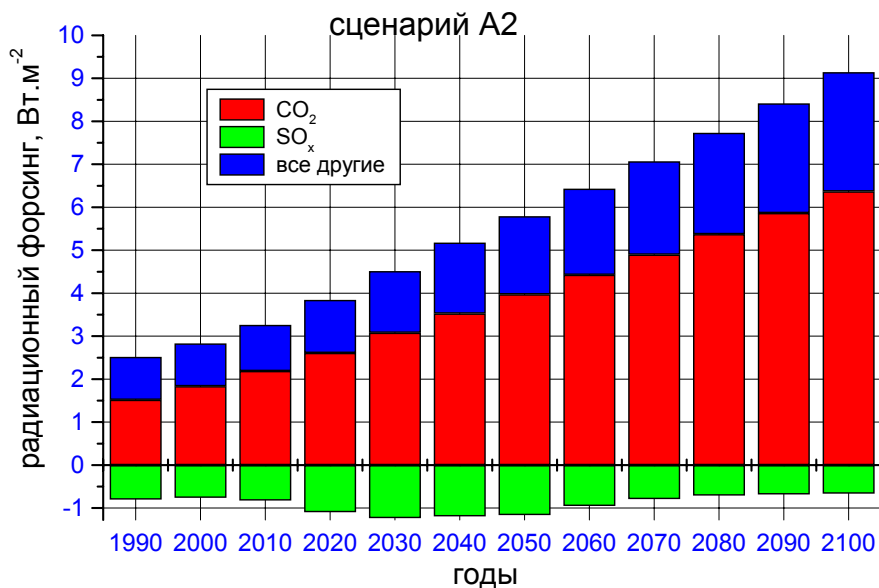


Рис.3. Изменение радиационного форсинга углекислого газа, SO<sub>x</sub> и всех других парниковых газов на протяжении XXI столетия по сценарию A2.

Из данных на рис.3 и аналогичных данных для других сценариев следует, что суммарный парниковый эффект углекислого газа может возрасти с 60% в 1990 году до 75-80% в 2100 году. Следует также пояснить, что отрицательный парниковый эффект SO<sub>x</sub> обусловлен предположением, что все окислы серы превращаются в аэрозольные частицы, обладающие антипарниковым эффектом, поскольку величина отражённого ими солнечного потока превышает поток земного ИК-излучения, посылаемый назад.

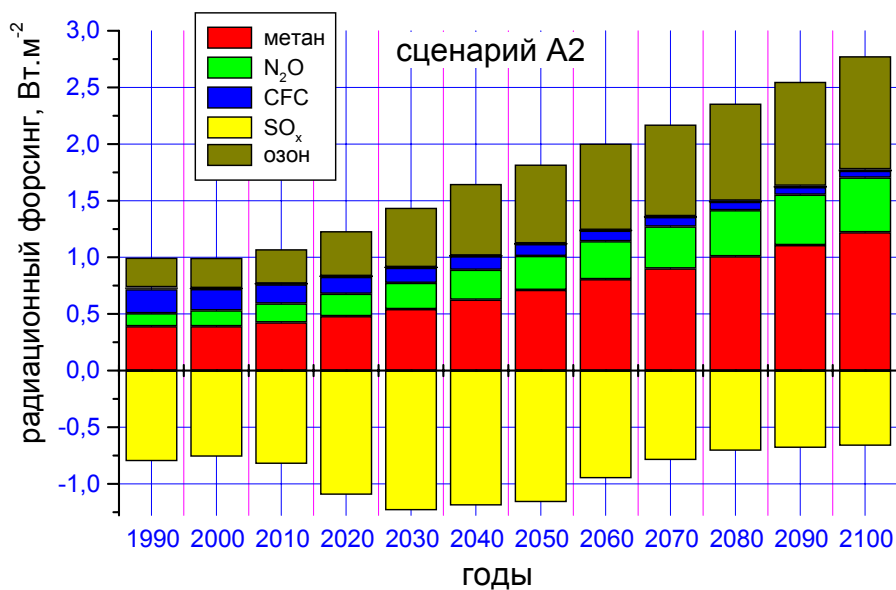




Рис.4. Изменение радиационного форсинга основных парниковых газов на протяжении XXI века по сценарию А2.

На рис.4 показано, как будет меняться парниковый эффект (радиационный форсинг) основных парниковых газов в XXI веке по сценарию А2. Можно видеть, что наибольший положительный вклад обусловлен метаном и озоном, а также закисью азота  $N_2O$ . Можно также видеть, что в 20-40-е годы суммарный положительный парниковый эффект всех парниковых газов (кроме  $CO_2$ ) практически компенсируется отрицательным парниковым эффектом сернокислых аэрозольных частиц.

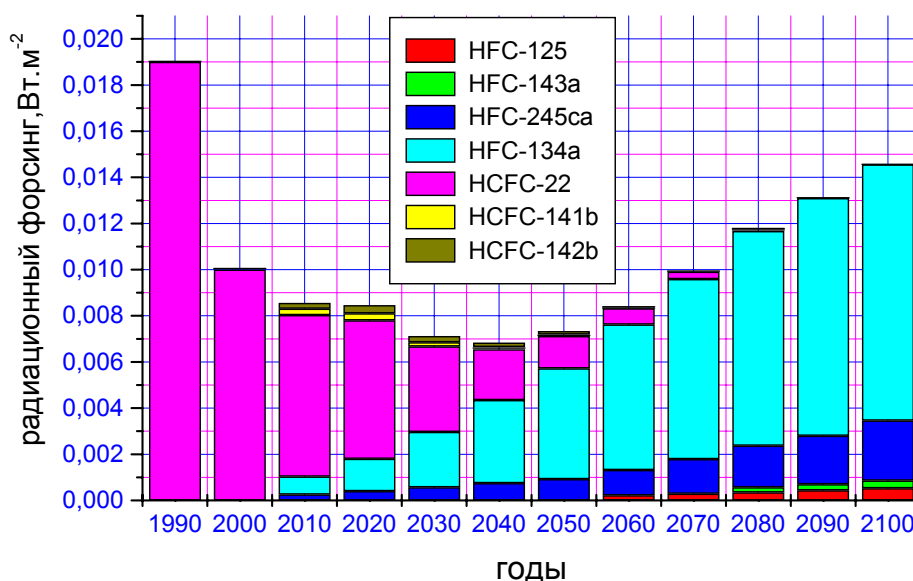


Рис. 5. Изменение парникового эффекта (радиационного форсинга) фреонов группы HCFC и группы HFC на протяжении XXI века.

На рис.5 показано, как будет меняться радиационный форсинг фреонов группы HCFC, которые будут использоваться только до 2030 года, и идущих им на смену фреонов группы HFC, обладающих нулевыми потенциалами озоновой опасности, которые будут использоваться после 2030 года в качестве окончательных заменителей озоноразрушающих фреонов группы CFC. Помимо того, что одна группа сменяет другую, можно видеть, что абсолютная величина парникового эффекта (радиационного форсинга) и тех, и других

невелика. В этом можно убедиться с помощью данных, представленных на рис. 6, где показан суммарный эффект групп CFC, HCFC и HFC.

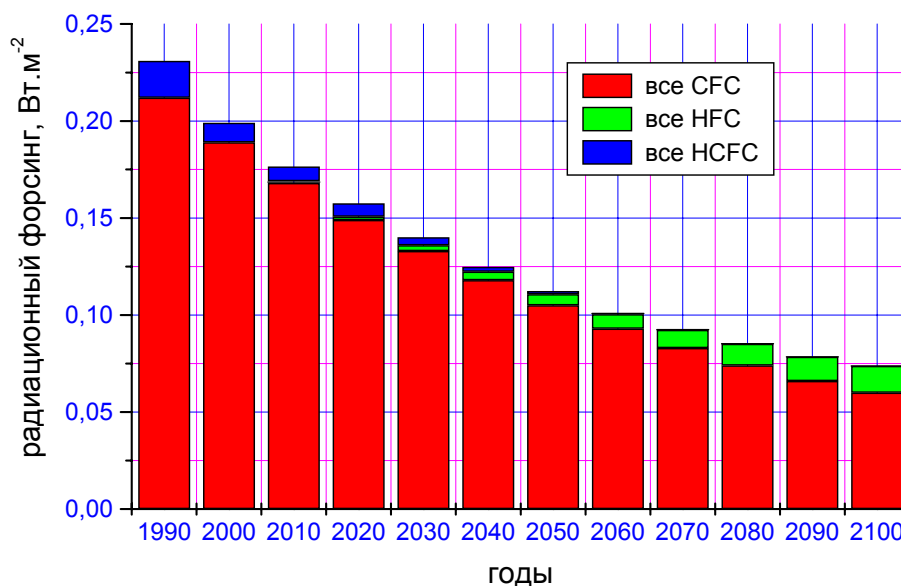


Рис.6. Изменение радиационного форсинга всех CFC, HCFC и HFC на протяжении XXI века.

Можно видеть, что на протяжении 2000-2100 годов основное влияние на климат будут оказывать остатки фреонов группы CFC (CFC-12, -13, -113), производство которых запретили ещё в конце XX века, но которые медленно выводятся из атмосферы, обладая временами жизни на порядок большими, чем альтернативные фреоны групп HCFC и HFC. Отсюда следует, что опасения относительно того, что альтернативные фреоны спасая озоновый слой, могут погубить климат, являются необоснованными (хотя, возможно, в XXII веке их роль в глобальном потеплении станет больше).

В заключение следует подчеркнуть, что в настоящей статье мы рассмотрели действие только одного фактора, управляющего климатом: прямое действие парниковых газов (правда незримо мы учитывали прямое и косвенное влияние на климат и атмосферных химических процессов, поскольку вычисление концентраций метана, озона

и групп HCFC и HFC проводилось с помощью математической модели, включающей более сотни химических процессов, в том числе и участием этих компонент). В действительности же таких факторов значительно больше и роль их в климатических прогнозах весьма существенна. Достаточно упомянуть многочисленные обратные связи в системе земля-атмосфера, которые “оживают”, как только приземная температура начинает изменяться. Стоит упомянуть и о проблеме региональных изменений, которые могут привести к глобальным климатическим последствиям, таких, как таяние льдов Антарктики и Арктики и сведение тропических лесов и др. Однако при всей сложности рассматриваемой проблемы следует иметь в виду тот неопровержимый научный факт, что при дальнейшем росте эмиссии антропогенных парниковых газов в атмосферу неизбежно наступит глобальное потепление, первые признаки которого уже дают о себе знать.

