

Д-р физ.-мат. наук
И.К.ЛАРИН

ФРЕОНЫ И КЛИМАТ ЗЕМЛИ

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

В XX в. появились признаки изменения климата. Во всяком случае, последнее столетие миллениума оказалось самым теплым в тысячелетии. «Реконструкция» климата в течение этого периода и данные измерений показали, что за последние 100 лет температура повысилась на $0,6 \pm 0,2$ °C, тогда как за предыдущие 900 лет она в среднем упала только на $0,2$ °C. Анализ этих изменений с помощью различных математических моделей позволил с достаточно большой долей уверенности утверждать, что наблюдаемое за последние 100 лет глобальное потепление обусловлено главным образом действием антропогенных факторов – ростом эмиссии углекислого 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 5 лет сократился на 250 км³. Важным признаком изменения климата является наблюдаемое снижение температуры на 5 °C в стратосфере (на высоте 50 км) и на 30 °C в мезосфере (на высоте 70 км). Здесь нужно пояснить, что в этих областях атмосферы парниковый эффект не повышает, а снижает температуру. Все это свидетельствует 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 еще более важно то, как будет изменяться климат в будущем.

General questions related to expected in XXI century global warming have been considered and the data of average global increase in temperature of the Earth's surface in 2000–2100 years are reported. Besides the contribution of freons in global warming have been analysed and it was shown that the share of the ozone friendly freons which will be used in refrigerating industry in the come century, is rather small.

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 ее изменение, начиная с 1%. Правда, изменение может быть весьма существенным, поскольку мировое хозяйство сегодня развивается совсем другими темпами, чем 100 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 T в этом случае можно рассчитать с помощью уравнения радиационного баланса

$$1/4 \cdot [S_0(1 - \alpha)] = \delta \sigma T^4. \quad (1)$$

Здесь S_0 – солнечная постоянная, т.е. поток солнечной радиации, приходящий на верхнюю границу атмосферы (равен 1368 Вт·м⁻²);

α – среднее альбедо системы Земля–атмосфера ($0,31$);

δ – коэффициент отличия земной поверхности от свойств черного тела ($0,98$);

σ – постоянная Стефана – Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴) [11]. Подставив все значения параметров в (1), получим $T = 255$ К. Особенность этой величины заключается в том, что, с одной стороны, она определяет температуру нашей планеты как космического тела, а с другой – является “нулевой” отметкой для расчета величины парникового эффекта, 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

величину ΔT_s . Принимают, что значение ΔT_s линейным образом связано с изменением радиационного баланса

$$\Delta F_R = F_{in} - F_{out},$$

который еще называют радиационным форсингом, т.е.

$$\Delta T_s = \lambda_c \Delta F_R, \quad (2)$$

где λ_c — коэффициент пропорциональности;

F_{in} и F_{out} — потоки излучения на землю и уходящие с ее поверхности;

$$\lambda_c = 0,3 \dots 1,1 \text{ K/(Вт} \cdot \text{м}^{-2}\text{)}.$$

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 найти связь ΔF_{Ri} с концентрацией парниковой компоненты C_i и знать, как изменяется значение C_i со временем, то можно оценить и изменение температуры земной поверхности в будущем.

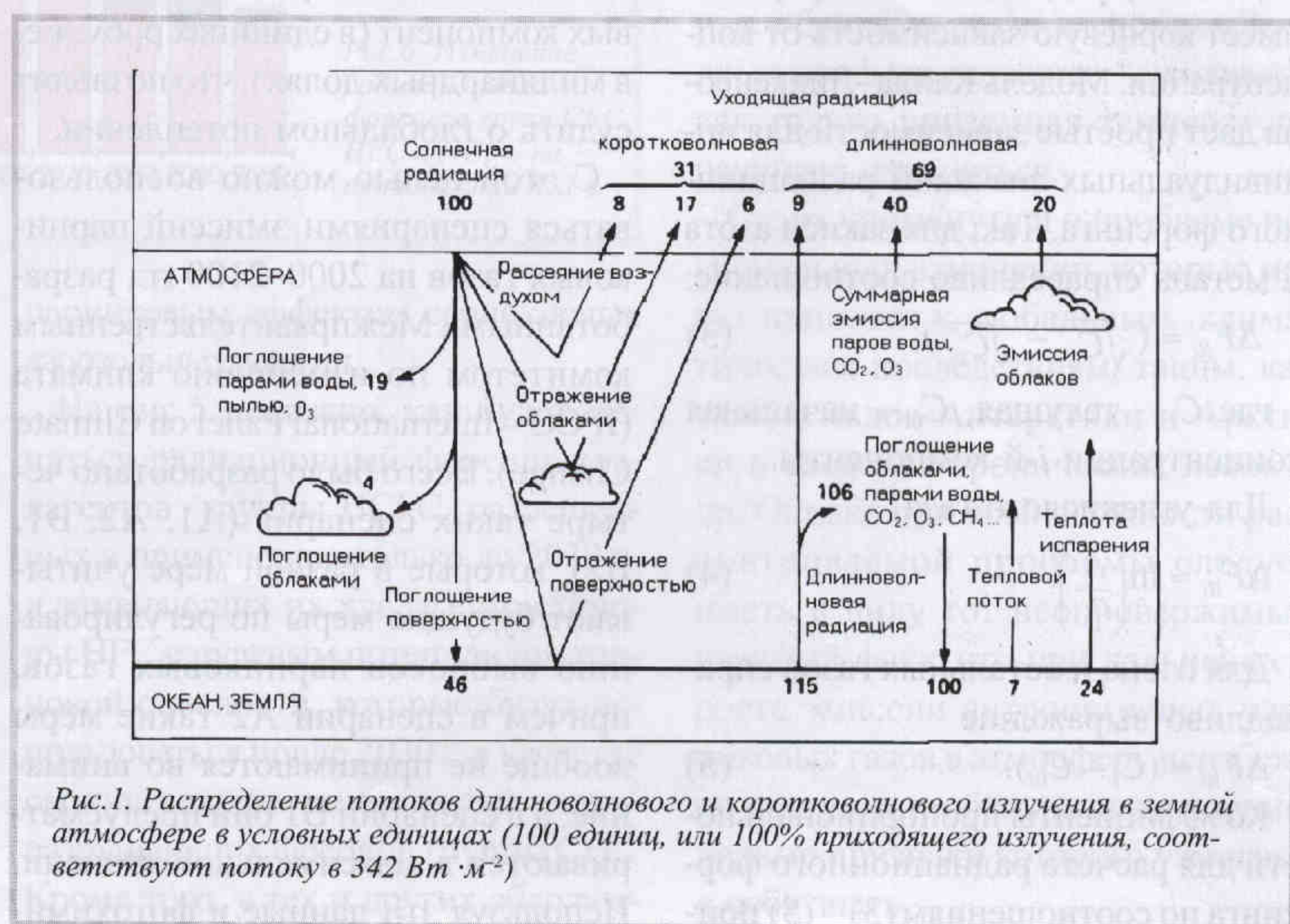
Искомая связь определяется тремя факторами:

- эффективностью поглощения инфракрасного (ИК) излучения данной компонентой (или иначе сечением поглощения);
- 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 ИК-излучение данная компонента, тем в принципе больше будет ее парниковый эффект);

• уже имеющимся количеством данной компоненты в атмосфере, или иначе ее оптической толщиной (если атмосферная концентрация компоненты велика и она поглотила почти все излучение в том диапазоне длин волн, где она поглощает, то дальнейший рост ее концентрации мало что изменит).

Для расчета радиационного форсинга ΔF_{Ri} i -й парниковой компоненты использовался конкретный тип зависимости форсинга от C_i . Нужно сказать, что если концентрация парникового газа в атмосфере мала, то ее увеличение 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 высокому атмосферному содержанию данной компоненты) влияние концентрации ослабевает и возникает логарифмическая зависимость от



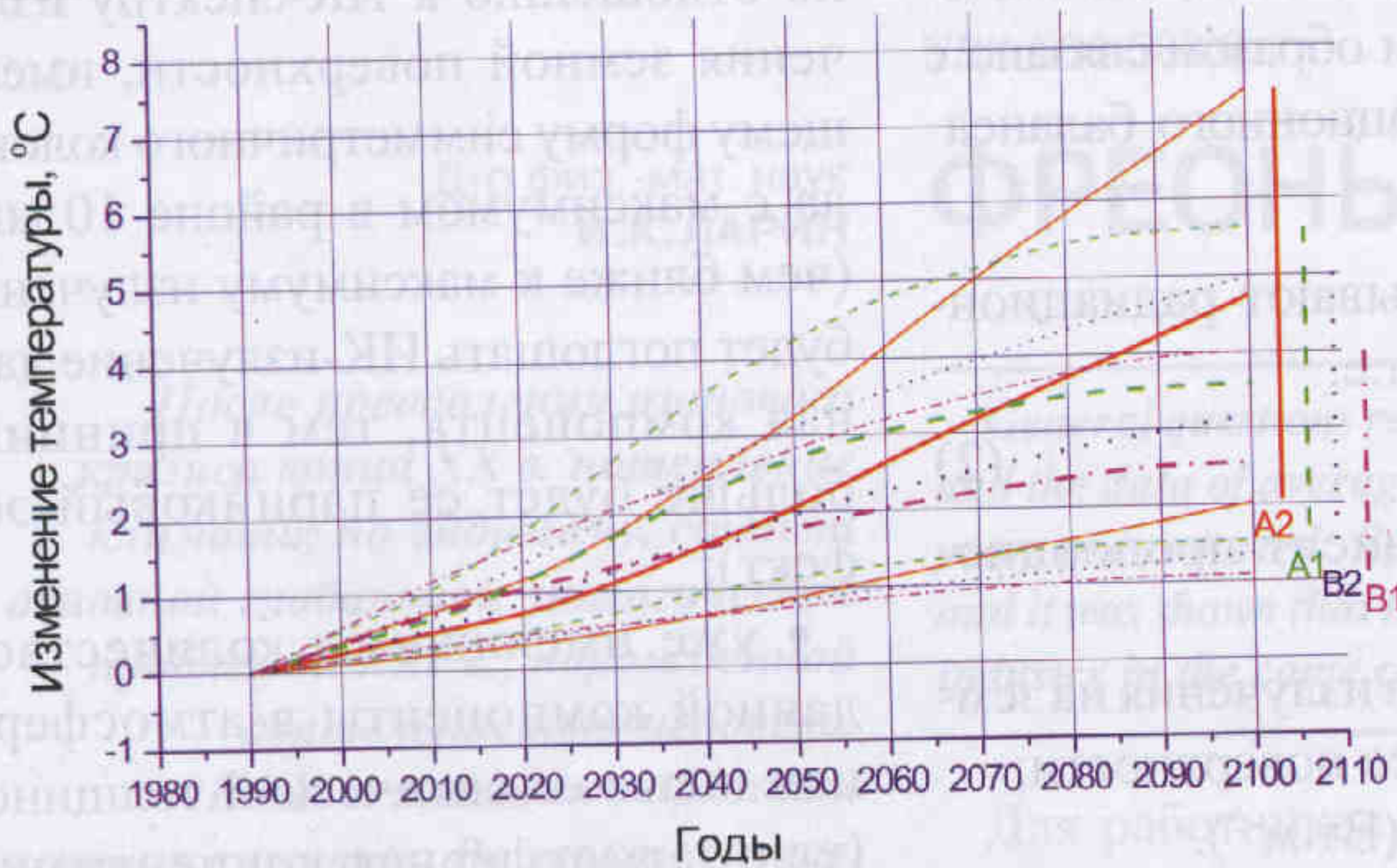


Рис. 2. Изменение температуры в 2000–2100 гг., рассчитанное по четырем сценариям Межправительственного комитета по изменению климата A1, A2, B1 и B2.

Жирными цветными линиями показаны средние значения для каждого сценария, а тонкими кривыми – диапазон изменений, обусловленный диапазоном изменений коэффициента λ_e в формуле (2)

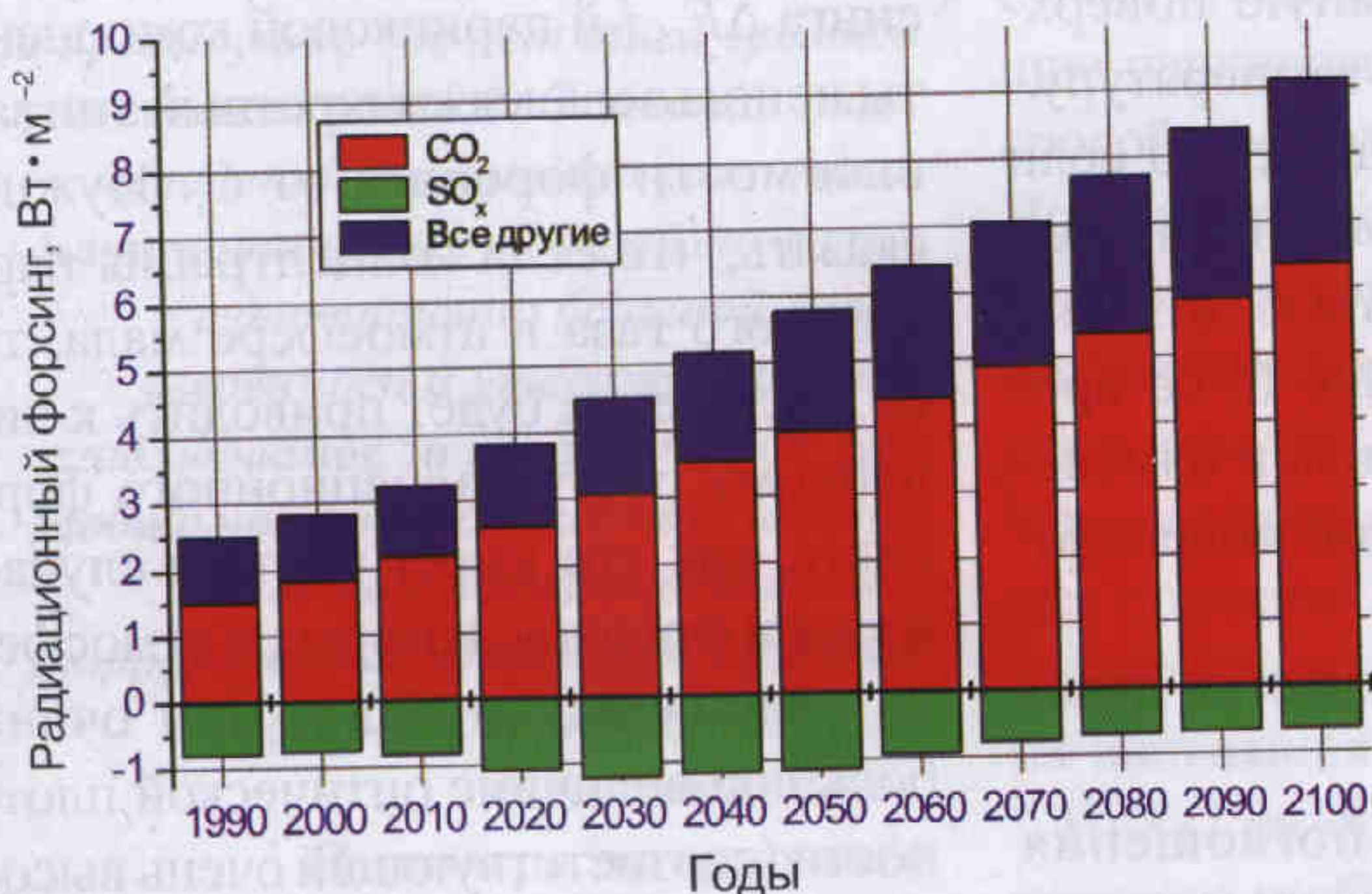


Рис. 3. Изменение радиационного форсинга углекислого газа, SO_x и всех других парниковых газов на протяжении XXI столетия по сценарию A2

нее, как это наблюдается с CO_2 . В промежуточном случае (закись азота, метан) радиационный форсинг имеет корневую зависимость от концентрации. Модель Кейла–Диккенсона дает простые зависимости для индивидуальных значений радиационного форсинга. Так, для закиси азота и метана справедливо соотношение:

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

где C_i – текущая, C_{0i} – начальная концентрации i -й компоненты.

Для углекислого газа

$$\Delta F_{Ri} \approx \ln\left(\frac{C_i}{C_0}\right). \quad (4)$$

Для озона и остальных газов справедливо выражение

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

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

ведены в таблице.

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

С этой целью можно воспользоваться сценариями эмиссий парниковых газов на 2000–2100 гг., 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, причем в сценарии A2 такие меры вообще не принимаются во внимание, а в сценарии B1 они предусматриваются в максимальной степени. Используя эти данные и фотохими-

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

Газ	Коэффициент, $Вт/(м^2 \cdot млрд^{-1})$	Газ	Коэффициент, $Вт/(м^2 \cdot млрд^{-1})$
CFC-11	0,22	HCFC-22	0,19
CFC-12	0,28	HCFC-123	0,18
CFC-113	0,28	HCFC-124	0,19
CFC-114	0,32	HCFC-141b	0,14
CFC-115	0,26	HCFC-142b	0,18
HFC-32	0,10	CO_2	7,6
HFC-125	0,24	N_2O	0,131
HFC-134a	0,17	CH_4	0,031
HFC-143	0,14	CCl_4	0,10
HFC-152	0,12	CH_3CCl_3	0,05
O_3	0,02		

ческую модель средней атмосферы, разработанную в Институте энергетических проблем химической физики РАН, мы рассчитали изменение концентраций всех парниковых газов в течение 2000–2100 гг. и на этой основе описанным выше методом определили возможное изменение температуры за этот период по четырем сценариям IPCC (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что по всем сценариям ожидается повышение температуры земной поверхности, причем максимальный диапазон изменений температуры за 100 лет составляет от 1,1 до 7,4 °C, а диапазон изменений средних значений – от 2,5 до 4,7 °C.

На рис. 3–6 показано изменение парниковых эффектов (в виде изменения радиационного форсинга) на протяжении XXI в. разных групп парниковых газов и разных индивидуальных веществ для сценария A2 (т.е. для сценария без мер регулирования).

Из данных на рис. 3 и аналогичных данных для других сценариев следует, что суммарный парниковый эффект углекислого газа может возрасти с 60% в 1990 г. до 75–80% в 2100 г. Следует также пояснить, что отрицательный парниковый эффект SO_x обусловлен предположением, что все оксиды серы превращаются в аэрозольные частицы, обладающие антипарниковым эффектом, по-

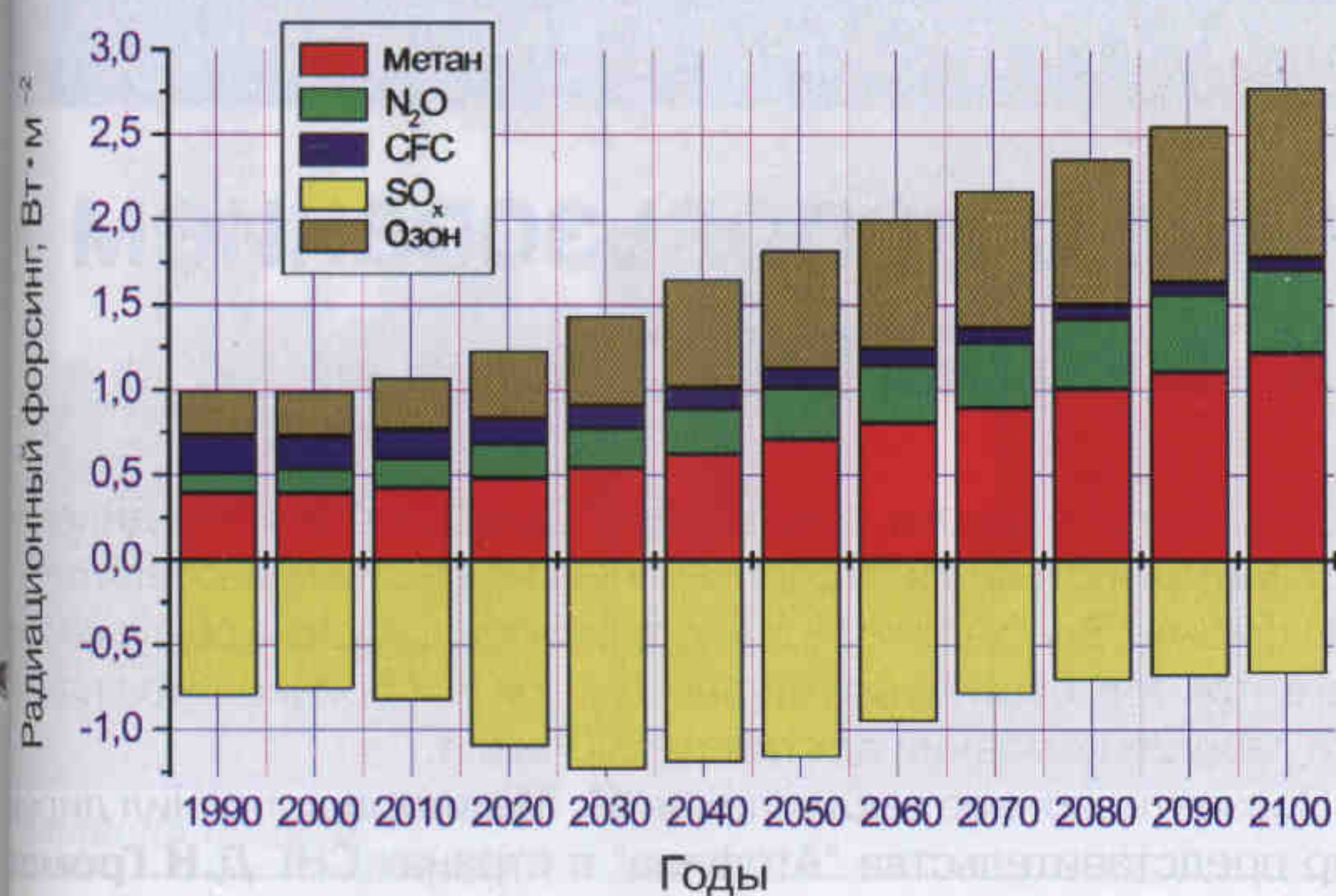


Рис. 4. Изменение радиационного форсинга основных парниковых газов на протяжении XXI в. по сценарию A2

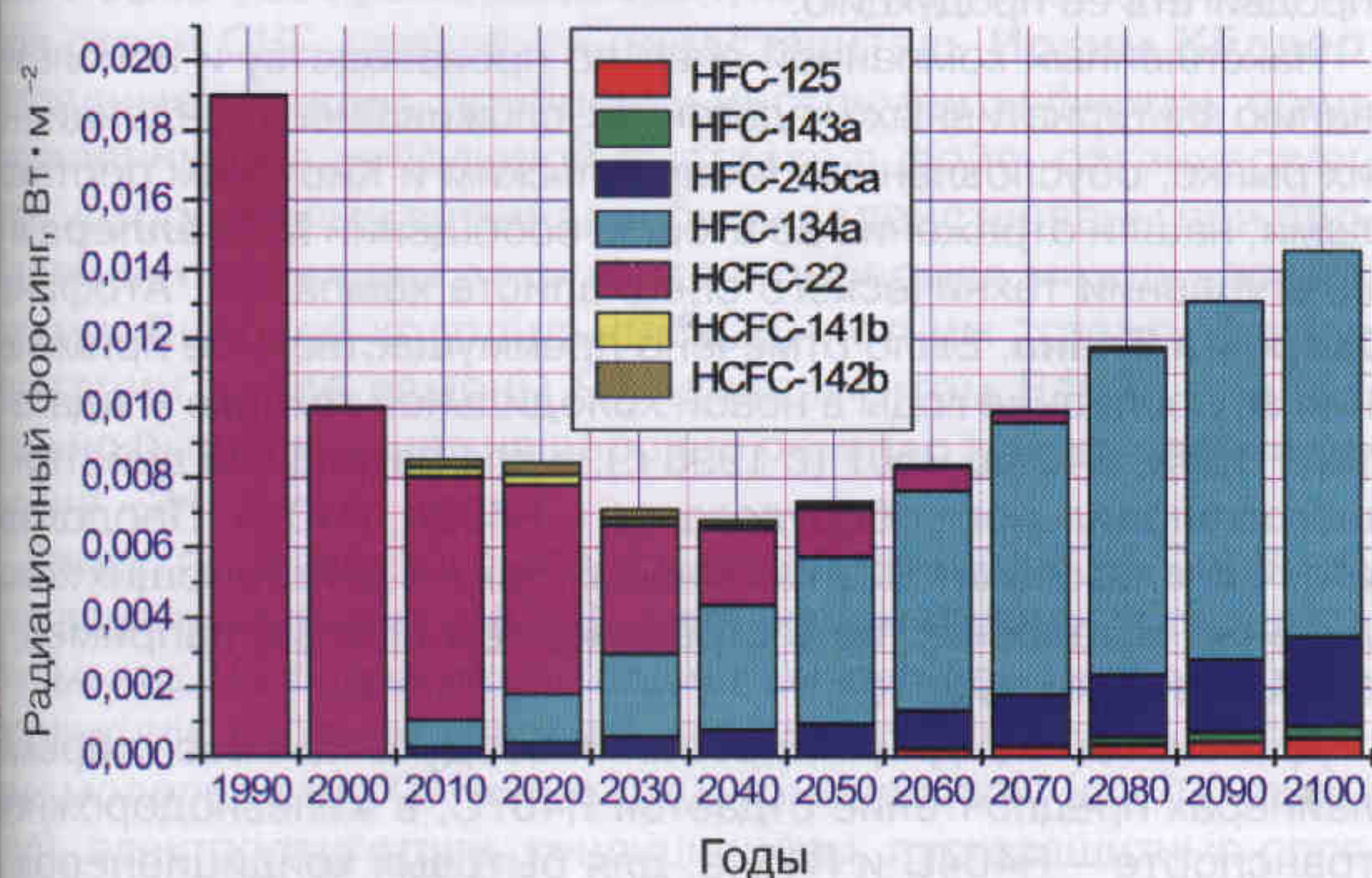


Рис. 5. Изменение парникового эффекта (радиационного форсинга) хладагентов групп HFC и HCFC на протяжении XXI в.

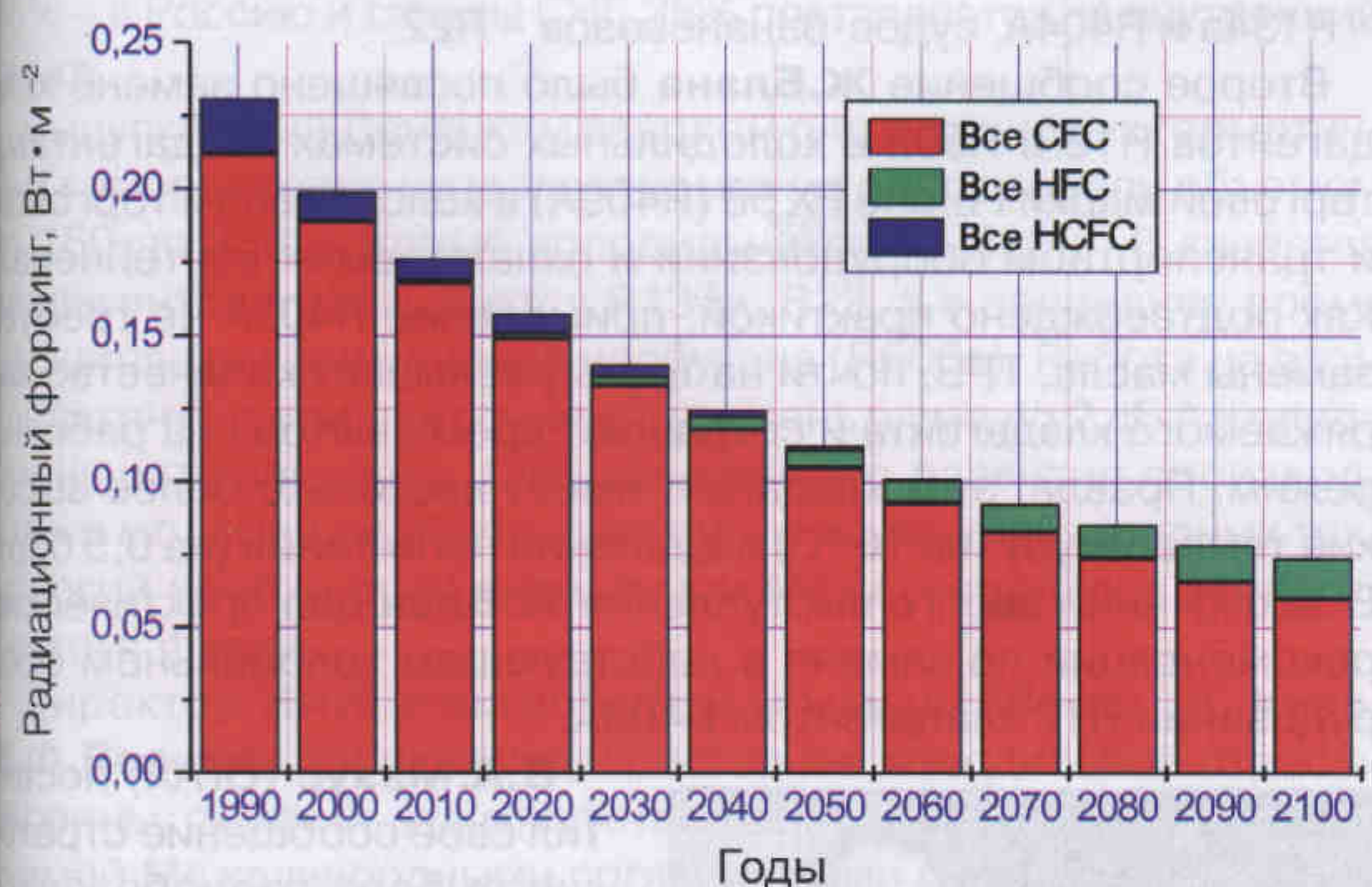


Рис. 6. Изменение радиационного форсинга групп CFC, HFC и HCFC на протяжении XXI в.

ная величина парникового эффекта (радиационного форсинга) невелика. В этом можно убедиться с помощью данных, представленных на рис. 6, где показан суммарный эффект групп CFC, HFC и HCFC.

Как видно из рис. 6, на протяжении 2000–2100 гг. основное влияние на климат будут оказывать остатки фреонов группы CFC (CFC-12, -13, -113), производство которых было запрещено еще в конце XX в., но которые медленно выводятся из атмосферы, обладая на порядок большим временем жизни, чем альтернативные фреоны групп HCFC и HFC. Следовательно, опасения, что альтернативные фреоны, спасая озоновый слой, могут погубить климат, являются необоснованными (хотя, возможно, в XXII в. их роль в глобальном потеплении станет больше).

В настоящей статье рассмотрено только прямое действие парниковых газов (правда, незримо было учтено прямое и косвенное влияние на климат и атмосферных химических процессов, поскольку концентрации метана, озона и групп HCFC и HFC вычисляли с помощью математической модели, включающей более сотни химических процессов). 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, таким, 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.

парниковым эффектом сернокислых аэрозольных частиц.

На рис. 5 показано, как будет меняться радиационный форсинг хладагентов группы HCFC, разрешенных к применению только до 2030 г., и заменяющих их хладагентов группы HFC с нулевым потенциалом озоновой опасности, которые будут использоваться после 2030 г. в качестве окончательных заменителей озоноразрушающих фреонов группы CFC. Кроме того, у тех и других абсолют-

только отраженный ими солнечный поток превышает поток земного ИК-излучения, посылаемый назад.

На рис. 4 показано, как будет меняться парниковый эффект (радиационный форсинг) основных парниковых газов в XXI в. по сценарию A2. Наибольший положительный вклад обусловлен метаном и озоном, а также закисью азота N₂O. В 20–40-е годы суммарный положительный парниковый эффект всех парниковых газов (кроме CO₂) практически компенсируется отрицательным