

Проф., д-р техн. наук

В.В.КЛИМЕНКО,

канд. техн. наук

А.Г.ТЕРЕШИН

Московский

энергетический институт

(технический университет)

ИЗМЕНЕНИЯ В МИРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛОРФТОРУГЛЕВОДОРОДОВ: ВЛИЯНИЕ НА АТМОСФЕРУ И КЛИМАТ

Вот уже более 10 лет в сфере производства и использования хлорфторпроизводных углеводородов (ХФУ), а также торговли ими действуют ограничения, определенные Монреальским протоколом по озоноразрушающим веществам (1987 г.) и последующими дополнениями к нему. Этот уникальный в мировой практике пакет документов, направленных на сохранение озонового слоя Земли, регламентирует деятельность в целом ряде отраслей мировой экономики, в том числе и холодильной. Как уже было показано авторами настоящей работы ранее [1], эти ограничения играют большую роль в снижении масштабов глобального потепления, так как все вещества, в отношении которых они действуют, являются сильными парниковыми газами. В настоящей статье приводятся данные, свидетельствующие о степени эффективности выбранного пути защиты окружающей среды и климата.

В течение последних лет в мире ведется учет объемов производства, продаж и использования ХФУ. Эти данные на добровольной основе предоставляются ведущими мировыми производителями химической продукции. Вначале такую деятельность координировала Ассоциация химических производителей (СМА), в настоящее время статистическая информация по ХФУ обобщается и регулярно публикуется в рамках Программы по изучению влияния альтернативных ХФУ на окружающую среду (AFEAS). На сегодняшний день в Программе принимают участие 14 крупнейших химических транснациональных корпораций из Европы, США и Японии, имеющих свои филиалы в Австралии, Южной и Северной Америке. На заводы этих компаний приходится основная доля в общем объеме мирового производства ХФУ: до 1987 г. она оценивалась в 85% объема мирового производства веществ класса CFC (полностью запрещенные ХФУ), а также HCFC-22* (представитель класса HCFC – гидратированных ХФУ). В дальнейшем эта доля снизилась (из-за более скорого вывода из эксплуатации в западных странах веществ класса CFC) и в 1997 г. составила около 40% для веществ класса CFC и 90% для HCFC-22 [3]. Остальную часть этих веществ вырабатывают в России, Китае и Индии, причем если в России объемы их выпуска постоянно снижаются (CFC – со 110 тыс. т в 1990 г. до 17 тыс. т в 1996 г.), то Китай увеличил их производство за тот же период вдвое, а Индия – втрое [2]. Что касается новых озонобезопасных ве-

ществ – HCFC-141b и -142b, а также HFC-134a (представитель класса HFC – полностью свободных от хлора ХФУ), то их производство практически целиком находится в западном мире и его объем полностью описывается данными AFEAS [3].

Объем мирового производства ХФУ в 1976–1997 гг. с учетом той его доли, которая не представлена в данных AFEAS [3], приведен на рис. 1, где показано изменение мирового промышленного выпуска веществ – представителей всех классов ХФУ – CFC-11, -12, -113, -114 и -115; HCFC-22, -141b и -142b; HFC-134a. Как видно из рис. 1, для ХФУ в целом характерен значительный спад производства после вступления в силу Монреальского протокола в 1987 г. За десять лет суммарный объем их выпуска (продаж) снизился в 2,3 раза – от максимального значения в 1,5 млн т в 1988 г. до примерно 650 тыс. т в 1997 г. Это связано с быстрым выводом из употребления веществ класса CFC, для которых снижение производства было еще более резким – с 1,28 млн т в 1988 г. до 140 тыс. т в 1997 г., т.е. почти в 9 раз, при уменьшении их доли в суммарном объеме производства ХФУ до 22%. За тот же период объем производства веществ класса HCFC, разрешенных международными соглашениями для использования вплоть до 2030 г. и являющихся в настоящее время одними из основных веществ, аль-

The influence of limitations as imposed by Montreal Protocol and its amendments concerning ozone depleting substances on the state of the environment and the climate was evaluated on the basis of the analysis of data on the production of CFC and their atmosphere concentrations during the last two decades. A share of refrigerating industry in the global production volume of freons and their ozone-safe substitutes is shown.

тернативных выводимым из употребления CFC, увеличился почти вдвое, достигнув в 1997 г. 400 тыс. т, или 63 % объема выпуска всех ХФУ. Объем производства HFC-134a, другого перспективного заменителя хлорсодержащих ХФУ, за короткий период с начала его промышленного производства в 1990 г. достиг в 1997 г. 100 тыс. т, т.е. около 15 % объема выпуска всех ХФУ. Таким образом, общий объем выпуска ХФУ, рассматриваемых в качестве альтернативы веществам, запрещенным к производству, составил в 1997 г. около 500 тыс. т, или около трети от пикового объема выпуска всех ХФУ в 1988 г., в то время как производство веществ класса CFC не превысило 10 % этого объема. Приведенные здесь данные свидетельствуют о том, что более 70% потребности в подобного рода веществах (с учетом ее роста за минувшее десятилетие) удовлетворяется другими путями, например применением углеводородов в качестве компонентов хладагентов или в аэрозолях, использованием углекислого газа или водяного пара при производстве пенополимеров и др.

Теперь посмотрим, какие перемены

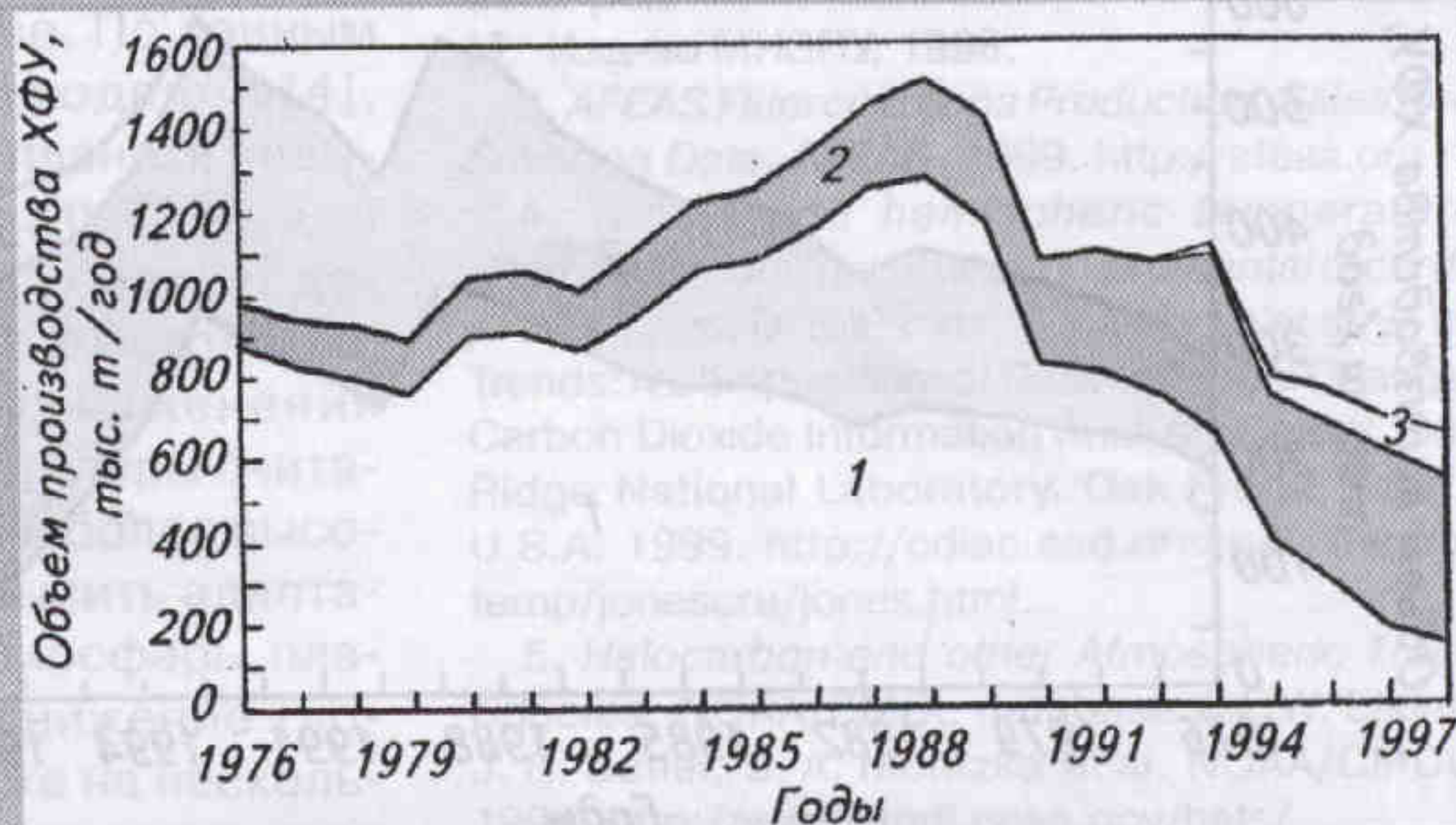


Рис. 1. Объем мирового производства ХФУ и его распределение по классам: 1 – CFC; 2 – HCFC; 3 – HFC

*Здесь и далее приняты универсальные обозначения ХФУ, непосредственно указывающие на принадлежность вещества к тому или иному классу (например, вместо R22 использовано обозначение HCFC-22).

произошли на рынке хладагентов и их компонентов. Как видно из рис. 2, на котором представлены объемы их производства в 1976–1997 г., изменения здесь носили менее радикальный характер. Во второй половине 1980-х и начале 1990-х гг. суммарный выпуск веществ классов CFC, HCFC и HFC для нужд холодильной промышленности продолжал колебаться на достаточно высоком уровне – 500–600 тыс. т в год и лишь начиная с 1994 г. начал заметно снижаться, достигнув к 1997 г. значения 430 тыс. т, или 73 % максимального объема производства в 1993 г., который составил 590 тыс. т. При этом продолжалось вытеснение из этой сферы веществ класса CFC, чья доля в объеме производства хладагентов снизилась с 60–65 % в 1970–1980-х гг. до 20 % в 1997 г. Для веществ класса HCFC и HFC характерна обратная динамика – объемы использования таких веществ в качестве хладагентов и их компонентов значительно увеличились и в абсолютном, и в относительном выражении, достигнув в 1997 г. соответственно значений 260 тыс. т (около 60 % всех хладагентов) и 90 тыс. т (примерно 20 %).

Эти изменения привели к тому, что холодильная промышленность в последнее десятилетие стала основным потребителем хлорфторуглеродных соединений. Действительно, если в 1970–1980-х гг. в качестве хладагентов использовалось 30–35 % всех ХФУ, то к середине 1990-х гг. эта доля увеличилась до 65 %, причем данная тенденция характерна и для соединений класса CFC: за этот же период доля веществ класса CFC, применяемых в холодильных установках, кондиционерах и тепловых насосах, возросла с 20 до 60 %. Что касается веществ класса HCFC, то в качестве хладагентов в 1997 г. использовано около 65 % их суммарного объема против 95 % в 1970-е гг. Это связано с частичным переходом полимерной промышленности на HCFC-141b и -142b в качестве вспенивающих агентов. Из веществ класса HFC до 90 % нашли применение в качестве хладагентов.

В целом новыми данными по производству ХФУ различных видов подтверждаются основные выводы ранней работы [1] авторов настоящей статьи. В частности, в прогнозе будущих объемов производства и эмиссии ХФУ верно были выбраны альтернативные вещества – HCFC-141b, -142b и -124 как промежуточная замена веществ класса CFC, а также HFC-134a как перспективный компонент озонобезопасных хладагентов. К сожалению, в обзоре [3] отсутствуют данные по другим веществам (HCFC-123 и HFC-32, -125, -143a и -152a), выбранным в нашем прогнозе [1] в качестве будущих заменителей веществ класса CFC. Однако увеличивающиеся объемы продаж смесей SUVA (Du Pont), KLEA (ICI), Forane (Elf Atochem) и ряда продуктов других производителей на основе этих веществ, а также строительство заводов по их производству говорят в пользу такого выбора. Также оказалось справедливым утверждение о возрастающей роли холодильной промышленности в использовании ХФУ.

Есть еще один способ оценить эффективность перехода на новые соединения и его влияние на состояние окружающей среды. Надежным инструментом для этого служит мониторинг атмосферных концентраций различных хлорфторсодержащих углеводородов. В настоящее время действуют две программы контроля за составом атмосферного воздуха:

- глобальный эксперимент по изучению атмосферных газов ALE/GAGE/AGAGE, проводимый с 1978 г. на пяти метеорологических станциях по всему миру [6];
- измерения концентраций малых компонентов атмосферы на сети станций Лаборатории мони-

торинга и диагностирования климата Национальной администрации США по океану и атмосфере NOAA/CMDL, функционирующей начиная с 1977 г. [5].

К сожалению, данные этих исследований не охватывают всех интересующих нас веществ, однако в них есть информация об основных озоноразрушающих и парниковых газах, которыми являются CFC-11, -12 и -113, HCFC-22, -141b и -142b, а также HFC-134a. По изменениям концентраций этих веществ в атмосфере можно судить о динамике их эмиссии и соответственно производства и использования.

На рис. 3 представлены данные [5, 6] об изменении среднеглобальных атмосферных концентраций основных ХФУ, выраженных в объемных частях на триллион ($1 \text{ трлн}^{-1} = 10^{-7} \text{ об.}\%$). Среднюю по земному шару концентрацию каждого компонента авторы рассчитывали по стационарным данным в предположении только меридионального распределения концентраций.

Как видно из рис. 3, а, в 1990-х гг. впервые за все время производства и использования веществ класса CFC прекратился рост их содержания в атмосфере. Так, к 1997 г. концентрация CFC-12 стабилизировалась на уровне 530 трлн^{-1} , а CFC-11 и -113 даже несколько снизилась: с 265 трлн^{-1} в 1992 г. до 259 трлн^{-1} и с

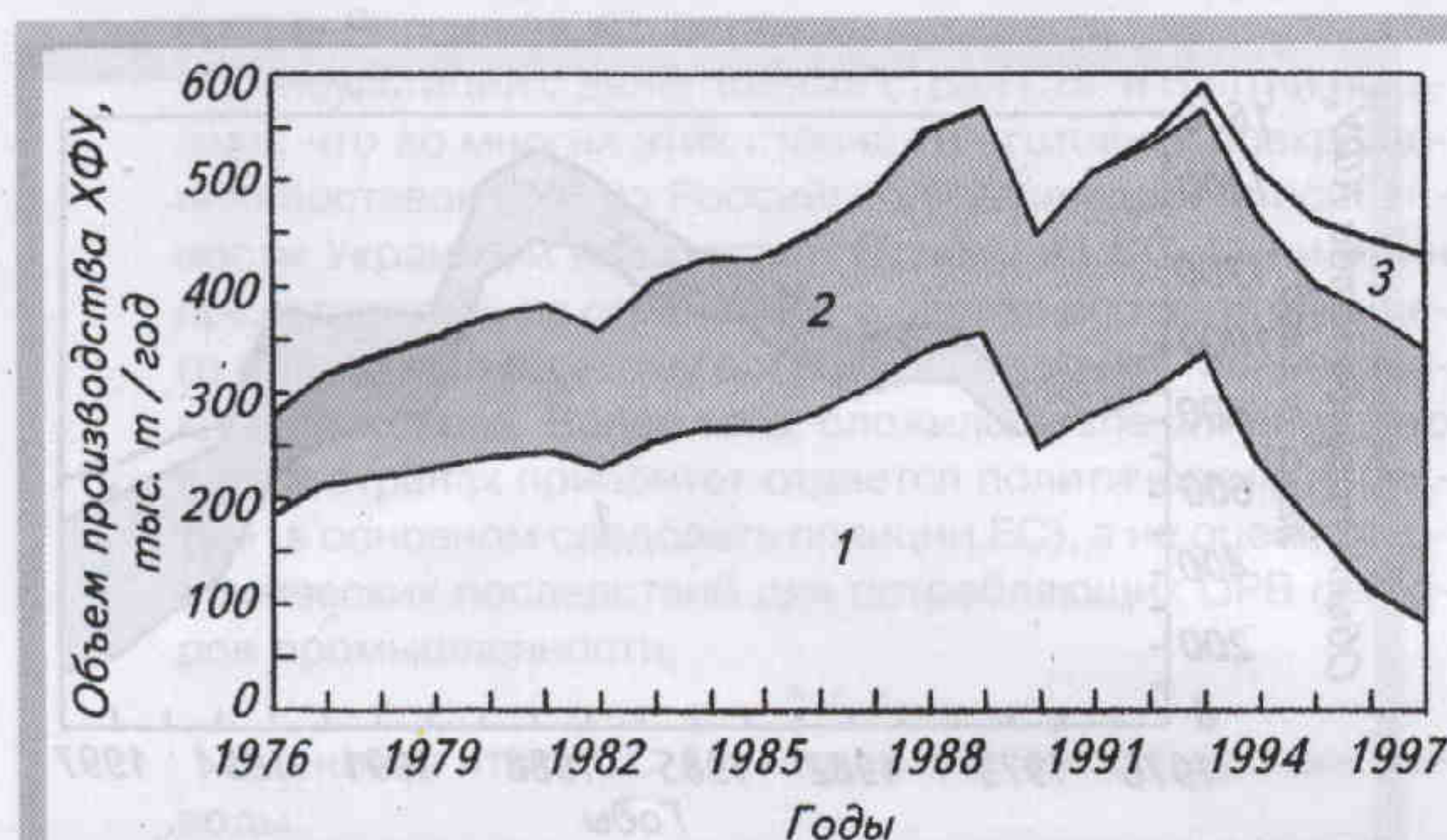


Рис. 2. Объемы мирового производства хладагентов и их компонентов и его распределение по классам: 1 – CFC; 2 – HCFC; 3 – HFC

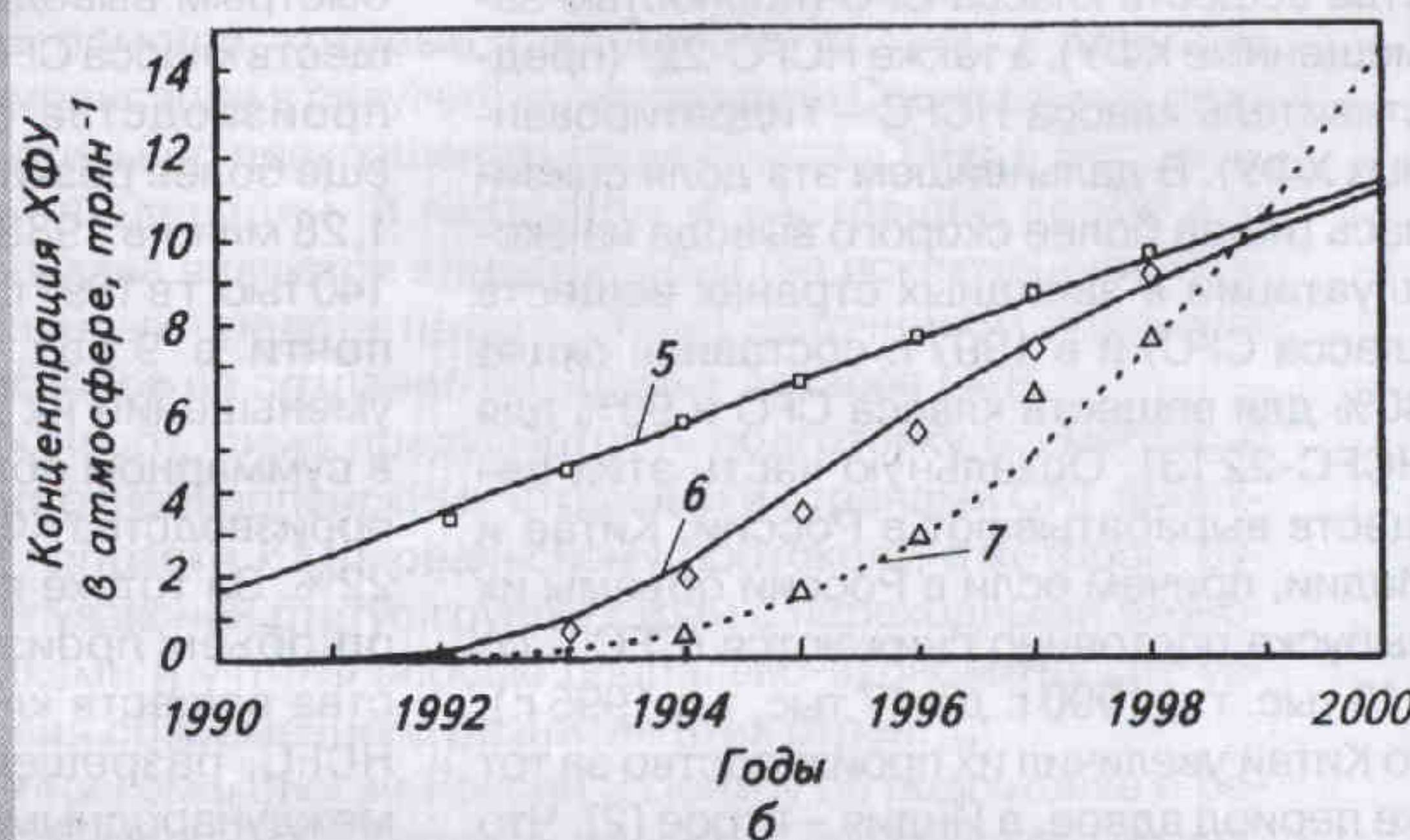
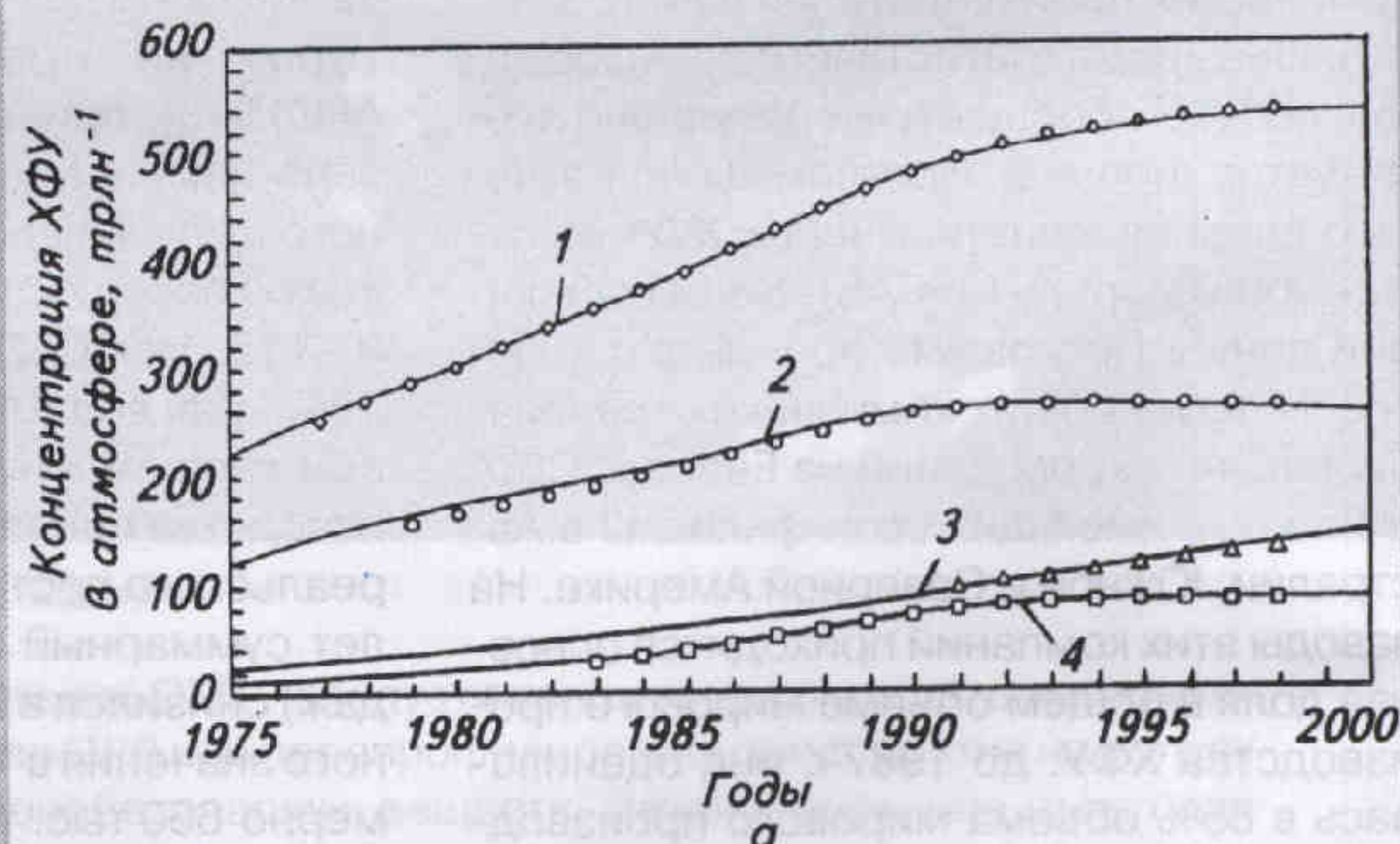


Рис. 3 (а, б). Изменения атмосферных концентраций основных ХФУ: 1 – CFC-12; 2 – CFC-11; 3 – HCFC-22; 4 – CFC-113; 5 – HCFC-142b; 6 – HCFC-141b; 7 – HFC-134a. Точками обозначены данные инструментальных наблюдений [5, 6], линиями – результаты расчетов авторов

ХФУ	R, (МВт/м²)/ трлн⁻¹	Изменение атмосферных концентраций ХФУ ΔC и соответствующие вклады в изменения теплового радиационного баланса ΔQ и среднеглобальной температуры Δt					
		1977–1987 гг.			1988–1998 гг.		
		ΔC, трлн⁻¹	ΔQ, Вт/м²	Δt, °C	ΔC, трлн⁻¹	ΔQ, Вт/м²	Δt, °C
CFC-11	0,22	85	0,019	0,008	21	0,005	0,002
CFC-12	0,28	175	0,049	0,022	88	0,025	0,011
CFC-113	0,28	38	0,011	0,005	25	0,007	0,003
Все вещества класса CFC			0,069	0,035		0,037	0,016
HCFC-22	0,19	40	0,008	0,003	59	0,011	0,005
HCFC-141b	0,14	0	0,000	0,000	9	0,001	0,001
HCFC-142b	0,18	0	0,000	0,000	10	0,002	0,001
Все вещества класса HCFC			0,008	0,003		0,014	0,007
HFC-134a	0,17	0	0,000	0,000	8	0,001	0,001
Все ХФУ			0,077	0,039		0,052	0,023

Примечание. R – коэффициент пропорциональности, связывающий изменения ΔC и ΔQ и зависящий от спектральных свойств газа [1].

85 трлн⁻¹ в 1995 г. до 84 трлн⁻¹ соответственно. Из-за высокой химической стабильности рассматриваемых веществ (а время их жизни в атмосфере составляет десятки и даже сотни лет), как было показано в работе [1], их концентрации в воздухе планеты будут оставаться значительными в течение всего следующего столетия даже при полном прекращении производства в его начале.

Наблюдается устойчивый рост концентраций в атмосфере альтернативных веществ классов HCFC и HFC: для HCFC-22 и -142b – практически линейный со скоростью примерно 5 и 1 трлн⁻¹ в год соответственно, а для HCFC-141b и HFC-134a (рис. 3, б) – экспоненциальный с темпами роста 45 и 85% в год соответственно. Согласно прогнозам авторов данной статьи [1], атмосферные концентрации веществ классов HCFC и HFC в следующем столетии, несмотря на ожидаемый рост их производства, так и не превысят максимальных значений, достигнутых для веществ класса CFC в конце 1990-х гг.

Результаты расчетов атмосферных концентраций перечисленных ХФУ, проведенных авторами по данным об их производстве, также представлены на рис. 3 и хорошо соответствуют результатам инструментальных наблюдений.

Попробуем оценить влияние наблюдаемых изменений на глобальный климат. В работе [1] нами были выполнены подобные вычисления для периода 1980–2100 гг. с учетом того, что тепловая нагрузка на атмосферу из-за увеличения содержания в ней парниковых газов (ХФУ) прямо пропорциональна изменению их концентраций, а чувствительность глобального климата к изменению радиационного баланса атмосферы равна

0,45 °C/(Вт·м⁻²). Теперь с помощью аналогичной методики мы сравним два десятилетия – “домонреальское” 1977–1987 гг. и “послемонреальское” 1988–1998 гг. Данные по изменениям концентраций ХФУ различных видов и соответствующих тепловых потоков приведены в таблице.

Как видно из таблицы, изменение теплового радиационного баланса атмосферы, вызванное увеличением концентраций ХФУ всех видов, за 1988–1998 гг. было в 1,5 раза ниже, чем за 1977–1987 гг. Это вызвано резким снижением темпов роста концентраций CFC-11, -12 и -113 в атмосфере. В результате соответствующий вклад ХФУ в повышение среднеглобальной температуры за 1988–1998 гг. составил 0,023 °C против 0,039 °C в 1977–1987 гг. При этом в “домонреальское” десятилетие соединения класса CFC обеспечили около 90 % этого эффекта, а в последующее их доля составила чуть более 70 %. Столь малые значения температурного роста не должны вводить в заблуждение. По данным инструментальных наблюдений [4], средняя температура на планете повысилась за 1977–1987 гг. на 0,17 °C, а за 1988–1998 гг. – на 0,16 °C. Следует добавить, что, по оценкам климатологов, критической скоростью изменения среднеглобальной температуры считается 0,1 °C в десятилетие, более высокие значения могут превысить адаптационные возможности биосферы планеты. Таким образом, снижение глобального потепления даже на несколько сотых градусов за десятилетие надо признать заметным вкладом “монреальских” соглашений в процесс охраны окружающей природной среды и климата.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

- Ограничения, накладываемые Монреальским протоколом по озоноразрушающим веществам и дополнениями к нему на рынок хлорфторуглеродных соединений, привели к значительному спаду производства полностью замещенных ХФУ: CFC-11, -12, -113, -114 и -115. За период 1988–1997 гг. объем их мирового производства снизился в 9 раз.

- Наметилась устойчивая тенденция к росту использования альтернативных веществ классов HCFC и HFC, представляющих меньшую опасность для озонового слоя Земли. За этот же период объем их производства увеличился в 2,5 раза, составив в 1997 г. около 500 тыс. т, из которых 20 % приходится на полностью свободный от хлора HFC-134a.

- Холодильная техника из-за технических и технологических трудностей перехода на новые озонобезопасные рабочие вещества стала основным потребителем ХФУ, что увеличило долю ее ответственности за формирование парникового эффекта. В 1997 г. в качестве хладагентов и их компонентов использовалось около 60 % CFC, 65 % HCFC и 90 % HFC.

- Перечисленные изменения на рынке ХФУ благоприятно сказались на состоянии окружающей среды. За последнее десятилетие прекратился рост атмосферных концентраций веществ класса CFC, наиболее опасных как для озонового слоя, так и для климата, наметилось их снижение.

- Переход на озонобезопасные вещества заметно снизил угрозу катастрофического глобального потепления. Вклад ХФУ в парниковый эффект за 1988–1998 гг. снизился в 1,5 раза по сравнению с предыдущим десятилетием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко В. В., Терешин А. Г. Монреальский Протокол и проблема глобального потепления климата планеты // Холодильная техника. 1996. № 5.
2. Соловьянов А. А. Озоновый кризис и монреальский протокол // Россия в окружающем мире: 1998. Аналитический ежегодник / Под. общ. ред. Н. Н. Моисеева, С. А. Степанова. – М.: Изд-во МНЭПУ, 1998.
3. AFEAS Fluorocarbons Production, Sales and Emission Data. AFEAS. 1999. <http://afeas.org>
4. Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records / P. D. Jones, D. E. Parker, T. J. Osborn et al. // In: Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 1999. <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html>
5. Halocarbon and other Atmospheric Trace Species. NOAA/CMDL database / J. W. Elkins, J. H. Butler, S. A. Montzka et al. NOAA/CMDL. 1999. <http://www.cmdl.noaa.gov/hats/>
6. The ALE/GAGE/AGAGE Network. CDIA DB1001 / R. Prinn, D. Cunnold, P. Fraser et al. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA. 1999. <http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/alegagage.html>