

С.Г. Звенигородский, В.У. Хаттатов, С.П. Смышляев

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ОЗОНОСФЕРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ВЫБРОСОВ ХЛОРФТОРУГЛЕРОДОВ НА БАЗЕ ФОТОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ 1-Д

Рассматривается проблема разрушения защитного слоя озона под действием хлорфторуглеродов. Обсуждаются альтернативные стратегии в промышленном использовании различных фреонов. Приводится набор сценариев выброса хлорфторуглеродов в атмосферу на период до 2050 г., которые соответствуют этим стратегиям. На базе одномерной фотохимической модели атмосферы с использованием указанных сценариев проведены численные эксперименты по прогнозу изменений общего содержания озона, его вертикального распределения и накопления активного хлора в атмосфере до 2050 г. Делается вывод о том, что промышленное использование любых хлорсодержащих фреонов является потенциально опасным с точки зрения воздействия на озоносферу.

Введение

Выброс в атмосферу хлорфторуглеродов (ХФУ) по современным представлениям рассматривается как потенциально наиболее опасный вид воздействия на озоносферу. В настоящее время эффекты, связанные с воздействием ХФУ на атмосферный озон, интенсивно изучаются в различных странах мира с привлечением одномерных (1-Д) и двумерных (2-Д) фотохимических моделей атмосферы (ФХМ).

Несомненно, что существующие качественные и количественные расхождения в полученных модельных прогнозах будущего состояния озоносферы диктуют и различные подходы к выработке ограничительных стратегий в промышленном использовании ХФУ. Вместе с тем на сегодняшний день можно констатировать и совпадение точек зрения по ряду важнейших позиций.

Так, например, практически все прогнозы на базе ФХМ показали доминирующую роль F-11 (CCl_3F) и F-12 (CCl_2F_2) в разрушении озонового слоя, что в настоящее время служит основанием для того, чтобы стремиться к запрещению их промышленного использования к концу текущего столетия в рамках Монреальского протокола. Менее изучен вопрос о целесообразности тех или иных стратегий, предполагающих возрастающее промышленное потребление F-22 (CHF_2Cl), CCl_4 или CH_3CCl_3 в качестве альтернативы на запрет F-11 и F-12. Анализ этой проблемы посвящена настоящая работа.

Численные эксперименты проводились на базе ФХМ 1-Д в диапазоне высот 0—60 км с шагом по высоте 1 км в тропосфере и 2 км в стратосфере [1]. С ФХМ состыкован радиационный блок, где на базе оптимизированной δ -эддингтон схемы рассчитываются константы скоростей фотолиза. Применение δ -эддингтон схемы позволяет корректно рассчитывать диффузную компоненту поля излучения, что принципиально важно для моделирования тропосферной фотохимии, а оптимизация вычислительной процедуры позволяет достичь быстроедействия, эквивалентного известному упрощенному методу [2].

Используемые сценарии. Процедура подготовки ФХМ

Очевидно, что начальные условия определяют временные масштабы реакции модели на эмиссию ХФУ с нижней границы.

Для согласования стартового этапа, начинающегося в 1985 году, UNEP (89) рекомендована процедура предварительного счета на временном интервале 20 лет до 1985 г.

Идея рекомендаций заключена в выведении всех ФХМ на квазистационарный режим, соответствующий в отношении вертикальных распределений важнейших газовых составляющих реальному уровню концентраций 1985 года.

После подготовительного сценария (табл. 1) в наших численных экспериментах, начиная с 1985 года, использовалось нижнее граничное условие в виде эмиссий. Данные для F-11, F-12 и F-22 соответствовали сценарию UNEP (89), а CCl_4 и CH_3CCl_3 согласно [3]. (см. табл. 2).

Вклад F-113, F-114, F-115, H-1211, H-1301 предполагался пренебрежимо малым по сравнению с F-11 и F-12 в соответствии с ранее полученными оценками.

Подготовительный сценарий — нижние граничные условия ($z = 0$)

Год	Концентрация элементов, млрд ⁻¹						
	N ₂ O	CH ₄	F-11	F-12	F-22	CCl ₄	CH ₃ CCl ₃
1960	289	1255	0,011	0,033	0,001	0,075	0,005
1965	292	1316	0,027	0,064	0,004	0,080	0,030
1970	295	1375	0,060	0,121	0,010	0,085	0,055
1975	298	1450	0,116	0,207	0,027	0,090	0,080
1980	302	1525	0,173	0,297	0,054	0,095	0,105
1985	306	1600	0,220	0,375	0,080	0,100	0,130

Сценарии роста после 1985 г.

Во всех сценариях возрастание приземной концентрации CH₄ составляло 1% в год, а N₂O — 0,25% в год.

Таблица 2

Элемент	Эмиссия Кг год	Ссылка
F-11	350	UNEP (89)
F-12	450	»
F-22	140	»
CCl ₄	66	[3]
CH ₃ CCl ₃	474	[3]

Сценарий I. Эмиссии всех ХФУ в период с 1985 года по 2000 год постоянны и соответствуют табл. 2, после 2000 г. — нулевые.

Сценарий II. Эмиссии всех ХФУ с 1985 до 2000 гг. постоянны и соответствуют табл. 2; после 2000 г. все эмиссии снижаются в два раза.

Сценарий III. Все ХФУ, включая CCl₄ и CH₃CCl₃, полностью заменяются на F-22 с эквивалентной эмиссией последнего — 1 Мт/год, постоянной по величине за весь период счета. Расчеты проводятся до установления квазистационарного состояния (50 модельных лет).

Сценарий I a. К сценарию I добавляется рост эмиссии CCl₄ от уровня 1985 года (табл. 2) 5% в год до 2000 года и далее 10% в год.

Сценарий I b. Аналогично I a с заменой CCl₄ на CH₃CCl₃.

Сценарий I c. Аналогично I a с заменой CCl₄ на F-22.

Сценарий I_b¹. Аналогично I b с уменьшением содержания ОН в атмосфере на 30%.

Сценарий I_b². Аналогично I b с уменьшением содержания ОН в атмосфере на 60%.

Сценарий III¹. Аналогично III с уменьшением содержания ОН в атмосфере на 30%.

Сценарий III². Аналогично III с уменьшением содержания ОН в атмосфере на 60%.

Выбор сценариев соответствовал следующим физическим концепциям:

— Учитывая длительное время жизни ХФУ в атмосфере (от 10 до 100 лет) сценарий I позволяет оценить время релаксации системы к фоновому состоянию и характер этой релаксации после прекращения эмиссий.

— Сценарий II имитирует стратегию с двухкратным уменьшением выбросов всех ХФУ к 2000 году.

— Сценарий III соответствует исходным посылкам авторов [3] при оценке возможных воздействий на озоносферу в случае замены всех ХФУ на F-22.

— Сценарии I a, б, с рассматривают альтернативные замены всех ХФУ на CCl₄, CH₃CCl₃ и F-22 в отдельности при одинаковом росте эмиссии.

— Сценарии I_b¹, I_b², III¹ и III² учитывают тот факт, что наряду с фотолизом в стратосфере для CH₃CCl₃ и F-22 существует значительный тропосферный сток в реакциях с гидроксидом (ОН).

Обсуждение результатов.

На рис. 1 представлены изменения суммарного озона по результатам выполненных численных экспериментов в сравнении с данными двумерного [3] и одномерного [4] моделирования, полученными другими авторами. Кривая 1 (сценарий I), близко согласующаяся с расчетными по 2-Д модели OSLO [3] в предположении о выполнении полной системы ограничительных мероприятий, предусмотренных Монреальским протоколом, показывает, что временной масштаб релаксации озоносферы к фоновому состоянию после полного прекращения воздействий составляет несколько десятков лет и к 2040 году возможно сохранение дефицита суммарного озона на уровне 3–4%. Все остальные кривые на этом рисунке: $I_{a,b,c}$; I_b^1 ; II; 1, 2, 3, соответствующие тем или иным альтернативам в использовании ХФУ, демонстрируют лишь незначительные количественные расхождения, подчеркивая главный вывод – возможное уменьшение суммарного озона на 8–10% без введения жестких запретительных мер на выброс хлорсодержащих ХФУ.

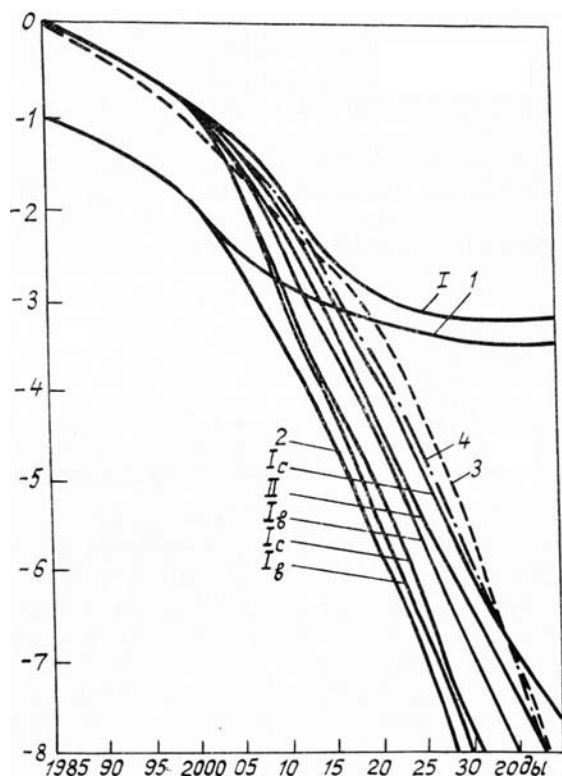


Рис. 1. Уменьшение общего содержания озона (в процентах к уровню 1985 г.) при различных сценариях выброса ХФУ. 1 – результаты расчетов [3] (2-Д) при полном прекращении выбросов ХФУ к 1990 г.; 2 – результаты расчетов [3] (2-Д) при сохранении существующих темпов роста потребления ХФУ; 3 – результаты расчетов [4] (1-Д) (*high scenario*); 4 – результаты расчетов по сценарию 1a с ростом эмиссии CCl_4 2% в год. Остальные кривые обозначены в соответствии со сценариями выбросов ХФУ (см. текст)

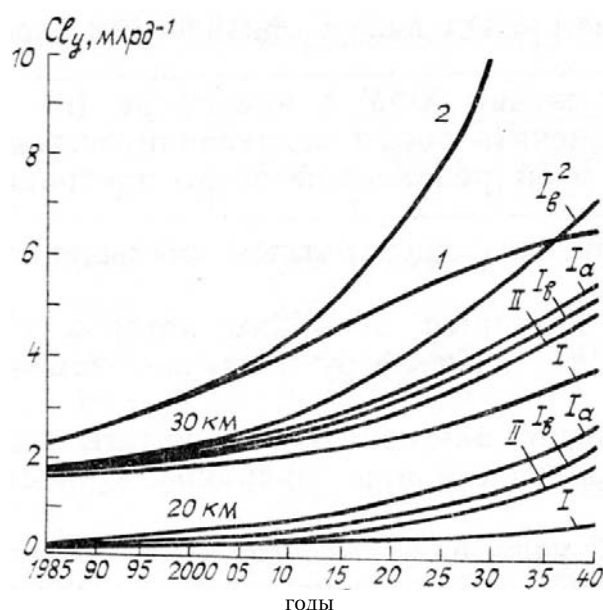


Рис. 2. Накопление активного хлора в стратосфере по результатам численных экспериментов. 1 – результаты [3] (2-Д) для варианта «No control»; 2 – то же при введении ограничительных мер в соответствии с протоколом

Рис. 2 содержит информацию о накоплении активного хлора (Cl_y) в стратосфере при различных сценариях. В рамках проведенных нами численных экспериментов наиболее сильная аккумуляция Cl_y в стратосфере наблюдается при сценарии I_b^2 , что подчеркивает необходимость более подробного исследования уровня концентраций ОН в тропосфере.

Привлекает внимание весьма высокое содержание хлора в стратосфере в 2-Д модели OSLO для варианта «No control».

Резюмируя результаты, в том числе приведенные на рис. 1, 2, можно сделать следующие выводы:

1) Поскольку главные источники и стоки Cl_y (эмиссия ХФУ и вымывание $HC1$ осадками) находятся в тропосфере, то режим накопления активного хлора на стратосферных высотах, и следовательно, истощение озонового слоя будут определяться эффективным потоком хлорсодержащих компонентов через тропопаузу.

2) В настоящее время накопленного в тропосфере запаса ХФУ будет достаточно для продолжения роста фонового уровня содержания СЦ на высотах озоносферы в течение десятков лет даже после полного прекращения эмиссий фреонов (кривая I на рис. 2).

3) Учитывая то, что разрушение озона происходит в каталитических циклах без расхода молекул активного хлора, а современный фоновый уровень содержания Cl_y в стратосфере умеренных широт может быть охарактеризован как «предкритический», а в приполярных широтах как «критический», любые альтернативы, связанные с хлорсодержащими заменителями, представляются весьма опасными.

Рис. 3 демонстрирует убыль озона в диапазоне высот (0–60 км в квазистационарном режиме при постоянном потоке F-22 с поверхности 1 Мт/год (см. сценарий III, III¹ и III²). Кривая III^F соответствует ранее полученным П. Фабианом с соавторами [5] результатам в рамках 1-Д ФХМ с аналогичным комплектом исходных данных.

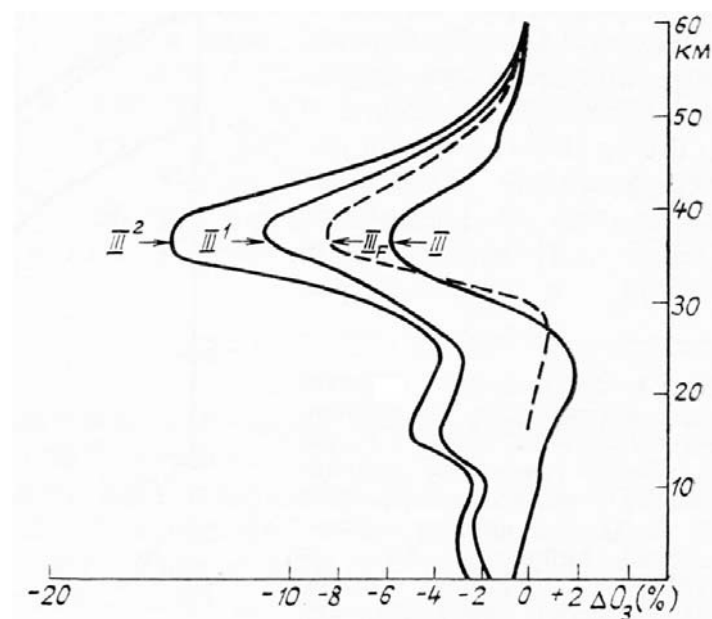


Рис. 3. Изменение содержания озона в диапазоне высот 0–60 км при замене всех ХФУ на F-22. III^F — результаты моделирования [5] (1-Д), остальные обозначения соответствуют сценариям (см. текст)

Отметим близкое качественное и количественное соответствие результатов [5] с нашими расчетами (III и III^F). Кривые III¹ и III² соответствуют 30 и 60%-му уменьшению содержания ОН. Подчеркнем, что в этих случаях проявляется значительное усиление эффекта с максимумом в слое 34–38 км (дефицит озона до 16%). Это обстоятельство позволяет еще раз акцентировать внимание на принципиальной роли тропосферного ОН в выполненных прогнозах. В настоящее время фоновый уровень ОН в тропосфере идентифицируется в диапазоне концентраций 10^5 – 10^6 мол/см³ с отчетливыми (до порядков величины) вариациями с временными периодами от нескольких минут до сезона. Механизмы уменьшения концентраций ОН в тропосфере могут быть связаны: а) с экранированием УФ-излучения облачностью; б) с вымыванием H_2O_2 — важного резервуара ОН — в облаках и осадках; в) с гетерогенной гибелью ОН и HO_2 на поверхности тропосферного аэрозоля.

В заключение авторы выражают свою глубокую признательность С.П. Смышляеву (ЛГМИ) и В.А. Маркову (НТО АН СССР), которые выполнили большой объем численных экспериментов и оказали практическую помощь при интерпретации результатов.

1. Звенигородский С.Г., Смышляев С.П. //Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1985. № 10. С. 1056–1069.
2. Isaksen I., Crutzen P.J., Mitbo P. //Geophys. Norv. 1977. № 31. P. 1–17.
3. Stratospheric ozone. UK Stratospheric ozone rev. groupe, second report. London, 1988. P. 88.
4. Wuebbles D. et al. //J. Geoph. Res. 1987. V. 92. № 4.
5. Fabian P., Borchers R., Duschka H., Kruger B.C. et al. CHCLF₂ (CFC-22): Distribution, budget and invironmental impact. //J. Geoph. Res. 1990. (In press.).

S.G. Zvenigorodskii, V.U. Khattatov, S.P. Smyshl'ayev. **Forecasting the Ozone State, Using the Photochemical Model 1-D, at Different Sceneries of the Chlorofluorocarbons Emissions into the Atmosphere.**

Destruction of the protective ozone layer due to the influence of chlorofluorocarbons is analyzed. Some alternative strategies of industrial utilization of different Freons are discussed. A number of sceneries of atmospheric pollution by chlorofluorocarbons which can occur till 2050 year according to these strategies are presented in the paper. Based on the one-dimensional photochemical model of the atmosphere and using the above mentioned sceneries a series of numerical experiments has been carried out on predicting the changes of the total ozone content and its vertical distribution along with the accumulation of active chlorine in the atmosphere during the time period till 2050 year. A unique conclusion is drawn in the paper that industrial use of the chlorofluorocarbons is potentially dangerous having in mind their destructive influence on the ozonosphere.