

УДК 533.9.07

О ПРОБЛЕМЕ СОХРАНЕНИЯ ОЗОнового СЛОЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПРОДОЛЖАЮЩЕМСЯ АНТРОПОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ АТМОСФЕРЫ

А. М. Старик

Центральный институт авиационного моторостроения
им. П. Н. Баранова (ЦИАМ), Москва, Россия

Работа посвящена глобальной экологической проблеме — сохранению озонового слоя Земли. Проведен анализ различных пассивных и активных методов восстановления озонового слоя в верхних слоях атмосферы. На базе достижений лазерной и космической техники предлагается оригинальный метод восстановления, основанный на более эффективном использовании солнечной энергии для увеличения скорости образования озона в стратосфере.

Одна из глобальных экологических проблем Земли — антропогенное загрязнение атмосферы. В результате деятельности человечества за последние десятилетия значительно увеличилось содержание в атмосфере малых газовых составляющих, в число которых входят оксиды азота, водорода, серы, углерода, аммиак, метан и другие углеводороды, галокарбонаты и сложные органические соединения. Несмотря на малое количество этих газов по сравнению с основными составляющими — O_2 и N_2 , увеличение их содержания по отношению к естественному фону может в значительной степени изменить условия существования жизни на Земле. Одни из них, например окись углерода, оказывают непосредственное воздействие на человека, в то время как действие других сказывается через совокупность сложных физико-химических процессов, протекающих в атмосфере. Наиболее важным вопросом, связанным с антропогенным воздействием на атмосферу, является разрушение озонового слоя Земли.

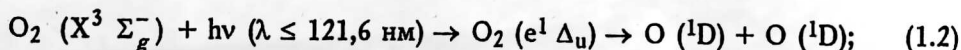
Известно, что озоновый слой предохраняет поверхность Земли от жесткого ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца (длина волны $\lambda = 200\text{—}320$ нм). Кроме того, при взаимодействии УФ-излучения в тропосфере с промышленными выбросами образуются кислоты, перекись водорода и озон, являющиеся веществами, опасными для животного и растительного мира. Изменение концентрации озона влияет также на температурный режим атмосферы и климат.

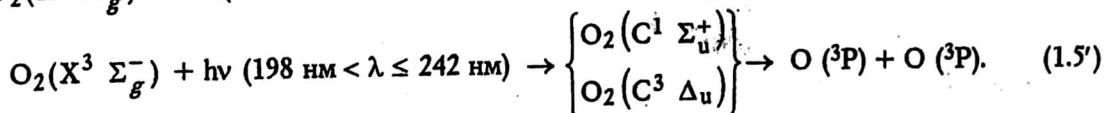
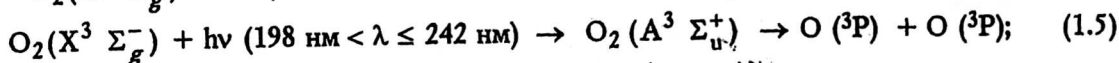
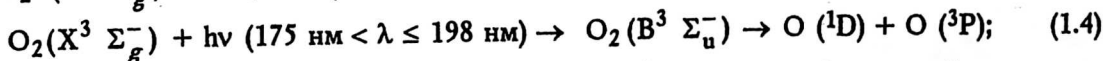
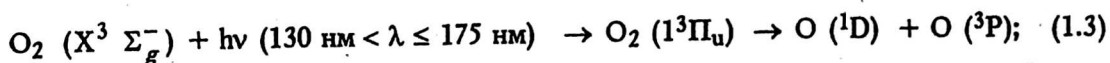
1. ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОЗОна В АТМОСФЕРЕ

Образование озона в атмосфере происходит при рекомбинации атомарного кислорода и молекул O_2 с участием третьей частицы М



Основным источником атомов $O(^3P)$ служит процесс диссоциации O_2 под действием УФ-излучения Солнца [1]. Считается, что фотодиссоциация молекулярного кислорода происходит при поглощении излучения (величина кванта $h\nu$ с длиной волны $\lambda = 115\text{—}242$ нм. При этом обычно [1—3] выделяют четыре спектральных диапазона: 1 — полосы Лаймана (L_α) с $\lambda = 115\text{—}121,6$ нм; 2 — континуум Шумана-Рунге с $\lambda = 130\text{—}175$ нм; 3 — полосы Шумана-Рунге с $\lambda = 175\text{—}198$ нм; 4 — континуум Герцберга с $\lambda = 198\text{—}242$ нм. Реакции фотодиссоциации при этом записываются в виде:





Обычно выделяют суммарную скорость фотодиссоциации из основного состояния $\text{O}_2 (X^3 \Sigma_g^-)$ по каналам (1.5) и (1.5'). На рис. 1 представлена схема электронных термов молекулы O_2 , а на рис. 2 — зависимость сечения поглощения O_2 от λ .

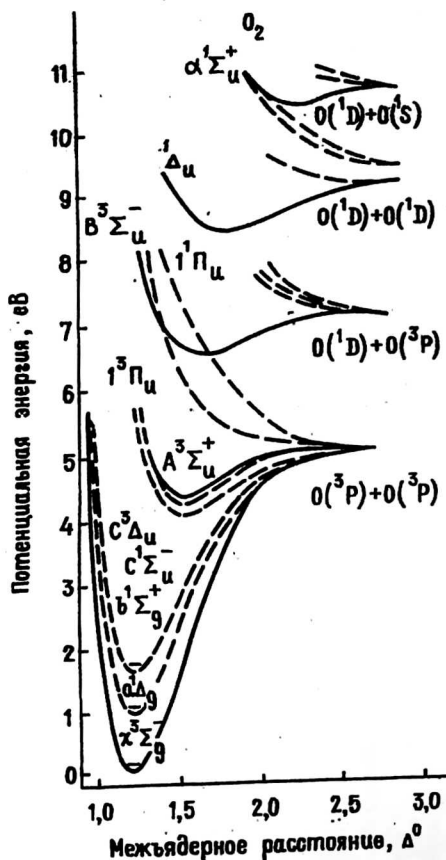


Рис. 1. Схема электронных термов молекул O_2

В последнее время в качестве дополнительного источника свободного кислорода в стратосфере рассматривается фотодиссоциация O_2 из возбужденных состояний $a^1 \Delta_g$ и $b^1 \Sigma_g^+$ [4—6]. Так, в работе [4] указывалось, что в соответствии с правилами отбора [7] наиболее вероятными в континууме Герцберга являются следующие переходы:

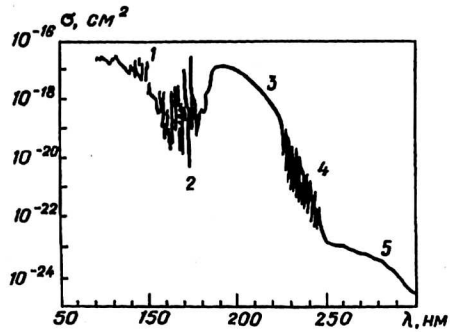
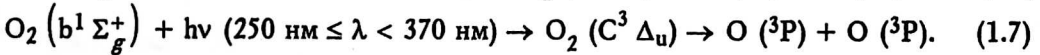
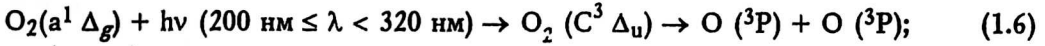
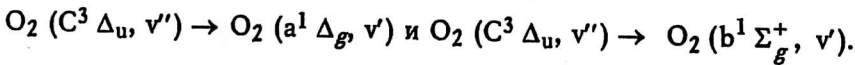


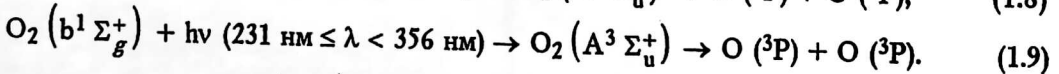
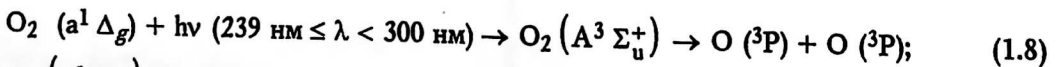
Рис. 2. Зависимость сечения поглощения молекулы O_2 от длины волны:

- 1 — ионизационный континуум; 2 — L_α (серия Лаймана); 3 — континуум Шумана-Рунге;
- 4 — полосы Шумана-Рунге; 5 — континуум Герцберга

Отметим, что изменение мультиплетности спина при переходе из синглетного состояния ($a^1 \Delta_g$) в триплетное ($C^3 \Delta_u$) налагает относительно слабый запрет по правилам отбора на указанные переходы. Еще в 1958 г. при изучении спектров ночного свечения неба [8] было обнаружено излучение с длиной волны 320—438 нм. Идентификация переходов, проведенная в [9], показала, что за это свечение ответственны переходы

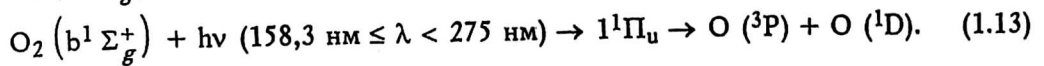
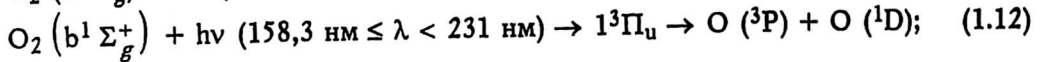
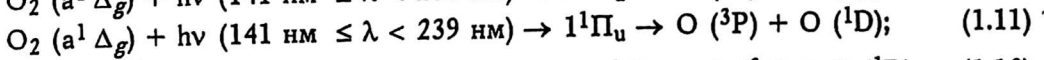
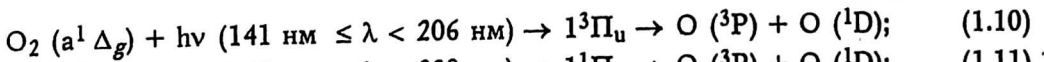


Это говорит о том, что процессы (1.6) и (1.7) могут наблюдаться в атмосфере. Другими возможными радиационными переходами из состояний $a^1 \Delta_g$ и $b^1 \Sigma_g^+$, приводящими к фотодиссоциации O_2 в области континуума Герцберга, являются переходы в состояние $A^3 \Sigma_g^+$:



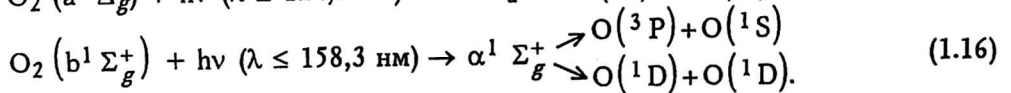
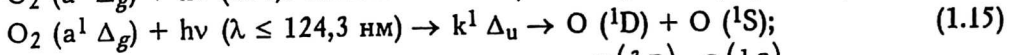
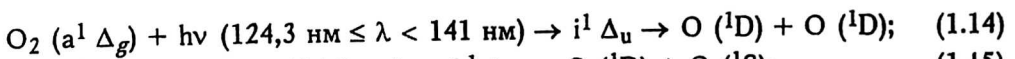
К сожалению, отсутствуют данные по измерению сечений процессов (1.6)—(1.9). В работе [3] были рассчитаны сечения поглощения молекулы O_2 в состояниях $a^1 \Delta_g$ и $b^1 \Sigma_g^+$ для спектральных областей, принадлежащих континууму Герцберга. Полученные максимальные значения σ для состояний $O_2(a^1 \Delta_g)$ и $O_2(b^1 \Sigma_g^+)$ оказались в несколько раз меньше соответствующего значения для основного состояния $O_2(X^3 \Sigma_g^-)$ ($\sigma_{\text{max}} = 4,5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ и $3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, соответственно). В более коротковолновой части спектра, соответствующего континууму и полосам Шумана-Рунге, возможными каналами фотодиссоциации O_2 из состоя-

ний $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ являются переходы на разлетные термы $1^3\Pi_u$, $1^1\Pi_u$ и через преддиссоциацию — в состоянии $B^3\Sigma_u^-$ [5]:



Все эти переходы являются оптически разрешенными и поэтому значения σ для них должны быть на несколько порядков выше, чем сечения для переходов из состояний $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ в континууме Герцберга (что имеет место и для переходов из основного $X^3\Sigma_g^-$).

В интервале спектра, соответствующем полосам Лаймана, продуктами фотолиза $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ являются $O(^1D)$ и $O(^1S)$ [10]:



В общем случае, по-видимому, должна существовать зависимость $\sigma_i(\lambda)$ для $i = a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g^+$, аналогичная функциональной зависимости $\sigma(\lambda)$ для переходов из состояния $X^3\Sigma_g^-$. На рис. 3 показаны зависимости $\sigma(\lambda)$ для переходов из состояний $a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g^+$ (сплошные кривые 1—2) в диапазоне длин волн $\lambda = 160$ —360 нм, полученные расчетным путем в соответствии с допущением об одинаковом характере зависимости $\sigma(\lambda)$ для переходов из этих состояний и из состояния $X^3\Sigma_g^-$ [6]. Здесь же пунктиром (1'—2') показаны зависимости $\sigma_i(\lambda)$ ($i = a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$) для континуума Герцберга, полученные в работе [3], и зависимость $\sigma(\lambda)$ — для переходов из основного состояния (кривая 3).

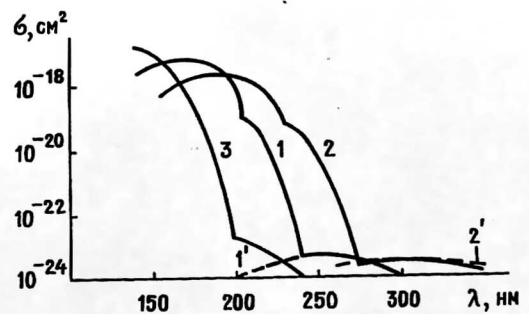


Рис. 3. Зависимость сечения поглощения молекулярного кислорода из электронных состояний $a^1\Delta_g$ (1), $b^1\Sigma_g^+$ (2) и $X^3\Sigma_g^-$ (3) от длины волны

Одновременно с процессом образования озона идут и реакции, приводящие к его разрушению. Одним из таких процессов является фотодиссоциация O_3 . Обычно выделяют коротковолновую область спектра с $\lambda < 198 \text{ нм}$, полосу Харт-

ли (Hartley) с $\lambda = 198\text{--}310$ нм, полосы Хеггинса (Huggins) с $\lambda = 310\text{--}360$ нм и полосу Шаппюи (Chappuis) с $\lambda = 410\text{--}730$ нм [1, 2]. Весьма важным при фотодиссоциации озона является достаточно точное определение продуктов реакции.

В табл. 1 приведены теоретические пороги образования различных продуктов фотолиза O_3 . Видно, что для одной и той же длины волны существует возможность образования O_2 и O в различных электронных состояниях. Анализ, проведенный в [6, 11], показывает, что в упомянутых четырех спектральных диапазонах протекают следующие процессы:

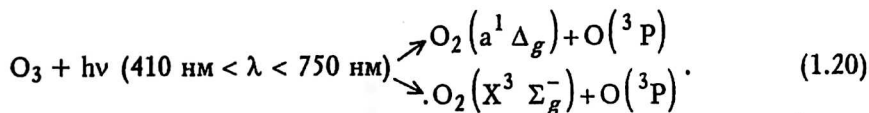
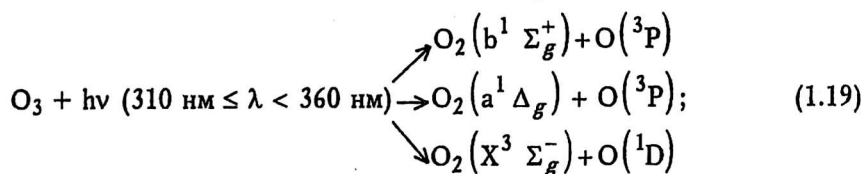
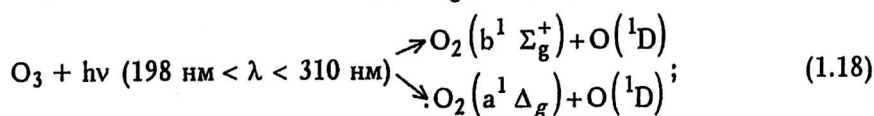
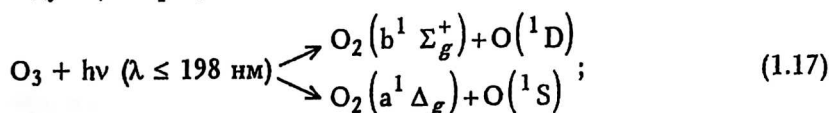


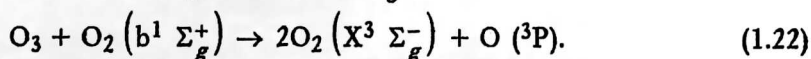
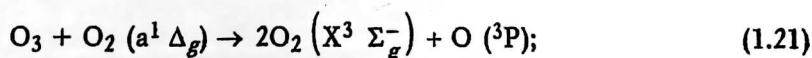
Таблица 1

Теоретические пороги (нм) образования различных продуктов фотолиза O_3

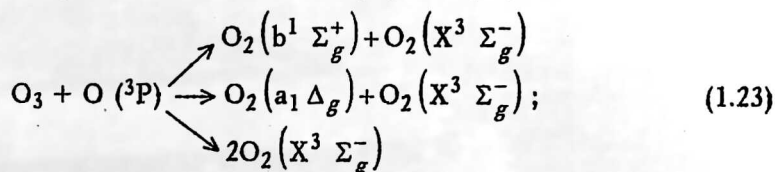
Наименование	$O_2(X^3 \Sigma_g^-)$	$O_2(a^1 \Delta_g)$	$O_2(b^1 \Sigma_g^+)$	$O_2(A^3 \Sigma_u^+)$	$O_2(B^3 \Sigma_u^-)$
$O(^3P)$	1180	590	460	230	170
$O(^1D)$	410	310	260	167	150
$O(^1S)$	234	196	179	129	108

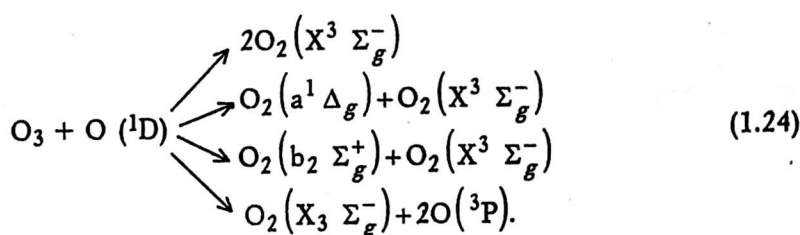
Процессы (1.17)—(1.19) являются основными каналами образования электронно-возбужденных молекул $O_2(a^1 \Delta_g)$ и $O_2(b^1 \Sigma_g^+)$ и атомов $O(^1S)$, $O(^1D)$ в атмосфере. Укажем, что в верхней стратосфере, вплоть до высот $H = 30$ км, доминирующим является процесс (1.18), т. к. он является причиной ослабления жесткого ультрафиолета, а ниже — процесс (1.20).

Молекулы $O_2(a^1 \Delta_g)$ и $O_2(b^1 \Sigma_g^+)$ достаточно эффективно вступают в реакцию с O_3 , являясь дополнительным источником его разрушения



Сзон также вступает в реакцию с атомами $O(^3P)$ и $O(^1D)$





Помимо кислородного, весьма важное влияние на образование и разрушение озона оказывают и другие газовые каталитические циклы. В общем виде процессы с участием некоторого компонента X, ускоряющего разрушение молекул O_3 , можно представить в виде



Важнейшими компонентами, каталитически разрушающими озон в реакциях (1.25), (1.26), считаются HO_x ($\text{H} + \text{OH} + \text{HO}_2$), NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), Cl , Br [12].

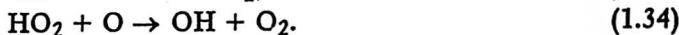
Остановимся сначала на каталитическом цикле с HO_x . В верхней атмосфере OH образуется при взаимодействии возбужденного атомарного кислорода с парами воды и молекулярным водородом, а также при фотодиссоциации H_2O и HO_2



Согласно современным представлениям радикалы OH и HO_2 играют ключевую роль во многих атмосферных процессах, прямо или косвенно влияющих на содержание O_3 . Непосредственное разрушение O_3 при взаимодействии с HO_x происходит при $\text{H} < 20$ км в следующих реакциях:



На высотах более 40 км HO_x связывает свободный кислород и, таким образом, уменьшает скорость образования озона в реакции (1.1)

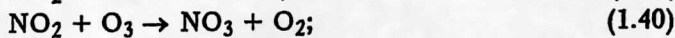
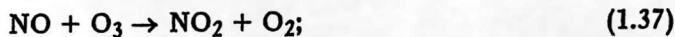


Кроме этих процессов, HO_x участвует и в других газовых и гетерогенном циклах разрушения O_3 . Например, с одной стороны OH конвертирует NO_2 в пассивную к озону азотную кислоту HNO_3 , а с другой — превращает HCl в активный Cl .

Рассмотрим цикл с NO_x . Основным естественным источником NO в атмосфере являются следующие реакции:

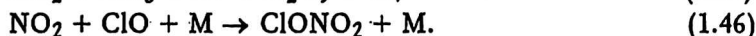


Каталитическое разрушение озона оксидами азота происходит в результате протекания целого комплекса процессов:





Исключительно важную роль в разрушении озона играют соединения, образующиеся при взаимодействии оксидов азота с HO_x и ClO_x



В полярных регионах эти соединения (HNO_3 , N_2O_5 , ClONO_2) участвуют в гетерогенном цикле разрушения O_3 . Отметим, что антропогенные источники NO_x и других азотистых соединений весьма многообразны, это энергоустановки, авиация, сельское хозяйство, взрывы в атмосфере и др.

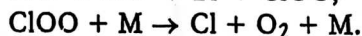
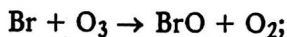
Одним из наиболее важных в настоящее время считается хлорный цикл. Проведенные измерения показали, что в атмосфере резко возросло содержание хлорсодержащих компонентов. Обнаружено, что уменьшение содержания O_3 связано с увеличением концентрации в стратосфере ClO . Это говорит о наличии каталитического цикла разрушения озона свободным Cl [13]



Присутствие свободного Cl в стратосфере обусловлено фотолизом хлорфторуглеродов (CFCl_3 , CF_2Cl_2 , CCl_4 и др.), поступающих из тропосферы, которые у поверхности Земли являются весьма устойчивыми соединениями.

Реакции (1.47), (1.48) играют основную роль в разрушении O_3 при $h > 30$ км. Освобождающиеся в процессе (1.48) атомы Cl могут многократно вступать в реакцию с молекулами O_3 . Это приводит к тому, что каждый атом Cl разрушает до 10^5 молекул озона.

На рис. 4, заимствованном из [14], показан газофазный цикл с участием Cl и ClO . Отметим здесь важность реакций с участием NO и NO_2 , которые при взаимодействии с ClO дают атомы Cl , чем в значительной степени усиливают разрушение O_3 на высотах < 30 км, где содержание O (^3P) мало. Следует также отметить, что разрушение озона происходит и при наличии свободного Br . Каталитический цикл при этом включает следующие реакции:



Определенное влияние на изменение концентрации озона оказывает и метан, окисление которого в верхней атмосфере приводит к увеличению концентрации H_2O .

Значительный вклад в разрушение озона вносят и гетерогенные процессы, которые играют определяющую роль в разрушении O_3 на высотах 15—25 км в полярных областях. Основной причиной их протекания является образование при низких температурах полярных стратосферных облаков (PSC's), содержащих либо частицы тригидрата азотной кислоты ($T \leq 195$ K), либо кристаллы льда ($T \leq 185$ K). Резкое уменьшение концентрации озона в районах образования PSC's (хорошо известная Антарктическая "озоновая дыра") обусловлено тем, что на поверхности таких частиц протекают химические реакции, приводящие к образованию молекул Cl_2 , ClO_2 , HOCl и ClNO_2 , при фотодиссоциации которых образуются озоноразрушающие компоненты Cl и ClO [15]. Зимой формирование PSC's приводит к денитрификации и дегидрации полярной атмосферы, а весной с

Окончание табл. 2

Показатели	Тип частицы				
	Сульфатный аэрозоль	ПСО — тип I	ПСО — тип II	Метеорная пыль	Выхлопы ракет
Радиус частицы, 10^{-6} м	0,01—0,5 (атмосф.); 0,01—10 (вулкан.)	0,3—3	1—100	1—100 (микрометеориты); 0,01—0,1 (дым)	0,1—10
Плотность частиц, $см^{-3}$	$\sim 1+10$	$\sim 0,1+10$	$\ll 1$	10^{-6} при 100 мкм, 10^{-3} при 1 мкм	10^{-4} при 10 мкм, 10^{-2} при 1 мкм
Основной состав	H_2SO_4/H_2O $\sim 70\%/30\%$	HNO_3/H_2O $\sim 50\%/50\%$	H_2O	SiO_2, Fe, Ni, Mg, C	Al_2O_3
Следовый состав	NH_4^+, NO_3^-	HCl, SO_4^{2-}	HNO_3, HCl	SO_4^{2-} (поверхность)	Cl^-, SO_4^{2-} (поверхность)
Физические характеристики	Суспензия	Кристаллы одного размера или капли	Протяженные кристаллы с поликристаллической структурой	Минеральные крупинки неправильной формы	Гомогенный состав; гладкие сферы

Таким образом, можно констатировать, что на изменение содержания озона в атмосфере влияет большое число различных соединений антропогенного происхождения. В табл. 3 указаны основные источники антропогенного загрязнения атмосферы и дана оценка их влияния на озоновый слой и климат.

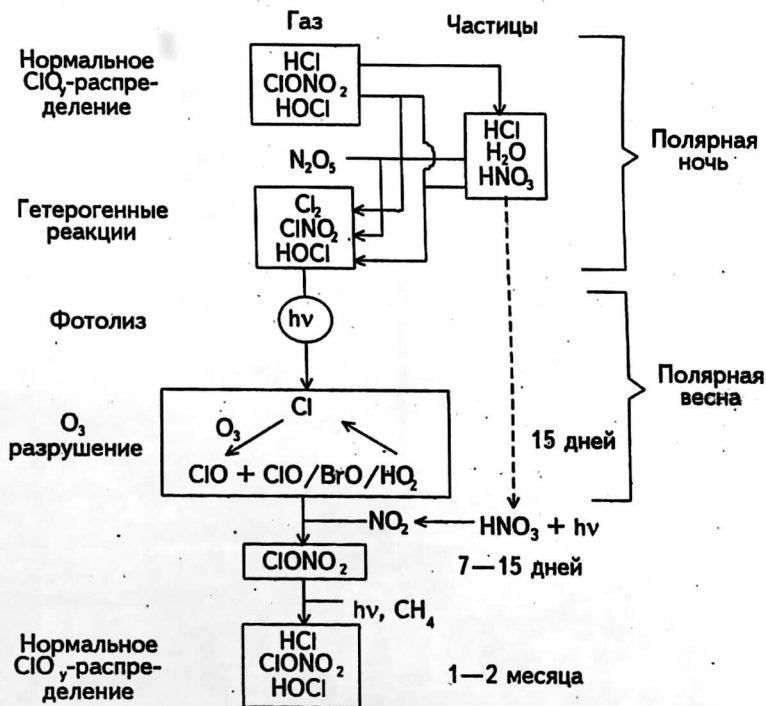


Рис. 5. Схема газофазных и гетерогенных процессов в полярной атмосфере, приводящих к образованию "озоновой дыры"

Таблица 3

**Главные источники антропогенного загрязнения атмосферы
и их влияние на озоновый слой и климат**

Источник загрязнения	Компоненты загрязнения	Влияние на концентрацию озона	Влияние на климат	Высота выделения загрязнения	Время восстановления характеристик атмосферы, год
Авиация	NO_x^* , H_2O^* , SO_2 , сажа, CO_2	Увеличение или ослабление в зависимости от высоты полета	Возможен рост температуры**	6—30 км	1—5
Станции на ископаемом топливе	CO_2 , N_2O , NO_x , H_2O , SO_2 , тепло, аэрозоли	Слабое увеличение при малой эмиссии N_2O	Рост температуры (потенциально большой)	Поверхность земли	50—100
Рефрижераторы, аэрозольные баллончики и другие галоуглеродные источники	CFCI и другие галоуглероды	Ослабление (потенциально большое)	Рост температуры***	То же	100
Азотные удобрения	N_2O^* , NH_3	Ослабление	Уменьшение температуры	"	10—100
Атомные станции	Радиоактивные изотопы (Kr^{85})*, H^* , C^{14} , тепло	Ослабление (образование NO)	Неизвестно	"	> 100

* Главная компонента.

** Многоплановый эффект: падение температуры из-за аэрозоли; уменьшение озона; рост температуры благодаря H_2O , инверсионному следу и NO_2 .

*** Преобладание "тепличного" эффекта.

2. МЕТОДЫ СОХРАНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ ЗЕМЛИ

Еще в 1980 г. результаты измерений указали на то, что антропогенное воздействие на атмосферу приводит к изменению концентрации озона. В последние 15 лет отмечена устойчивая тенденция к общему уменьшению содержания O_3 в атмосфере. При этом изменяется и характер распределения озона по высоте. Так, максимальное уменьшение концентрации O_3 наблюдается при $H = 18—25$ км, а при $H < 10$ км происходит его некоторое увеличение. К 1995 г. глобальное уменьшение концентрации озона по сравнению с уровнем 1970 г. достигло 8 %, а скорость его уменьшения составила 0,5 % в год. Следует, однако, отметить, что местные уменьшения содержания озона, особенно в полярных областях, оказываются гораздо большими. Так, в августе — сентябре 1995 г. площадь "озоновой дыры" над Южным полюсом достигла 10^7 км², что в два раза больше, чем в 1994 г., а дефицит озона в этой области на высотах 18—25 км составил 50 %. Впервые за все время наблюдений за озоновым слоем в январе — марте 1995 г. образовалась "озоновая дыра" и над Арктикой, затронув Северную и Восточную Европу, а также Сибирь.

Необходимо отметить, что мировое сообщество осознает опасность уменьшения озона в стратосфере. В 1985 г. была принята Венская конвенция по защите озонового слоя Земли, а в 1987 г. правительствами многих стран был подписан Монреальский Протокол по веществам, разрушающим озоновый слой. По этому

соглашению в мире должно быть резко сокращено использование хлорфторуглеродов (CFC's) в технологических процессах. Однако на совместной пресс-конференции, которая состоялась в апреле 1992 г., руководство WMO и UNEP (United National Environmental Program) заявило, что происходит дальнейшее уменьшение концентрации озона в стратосфере, а мероприятия, которые предписаны Монреальским протоколом и его дополнением (г. Лондон, 1990 г.) явно недостаточны. Согласно прогнозам, сделанным в середине 80-х годов, при наихудшем сценарии развития событий, когда решения Монреальского протокола не выполняются, а выброс CFC's остается на уровне 1987 г., глобальное уменьшение O_3 к 2020 г. должно составить всего 4 %. Однако уже в 1994 г. эта цифра была в два раза больше. Возникает вопрос: можно ли предотвратить надвигающуюся экологическую катастрофу? Очевидно, что усилия человечества должны быть сосредоточены на поиске дополнительных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление озонового слоя Земли. Эти мероприятия можно разделить на пассивные и активные.

К пассивным относятся мероприятия, позволяющие уменьшить или полностью исключить выбросы веществ, прямо или косвенно разрушающих озон. Учитывая, что, помимо галокарбонатов, к таким веществам относятся оксиды азота, водорода, серы, углерода, метан и другие соединения, то понятно, что эти мероприятия вообще уменьшают антропогенное загрязнение атмосферы и приводят к улучшению общей экологической обстановки.

Однако на современном этапе пассивные методы не способны решить проблему сохранения озонового слоя Земли. Даже если сегодня полностью прекратить выбросы всех разрушающих озон веществ, то разрушение его будет продолжаться еще 50—80 лет из-за присутствия уже выпущенных в атмосферу CFC's.

В последнее время широко обсуждаются методы активного воздействия на атмосферу. В основе этих методов лежат различные физико-химические процессы, приводящие либо к уменьшению скорости разрушения озона в стратосфере, либо к увеличению скорости его образования. Поскольку основным компонентом, наиболее интенсивно разрушающим O_3 , считается свободный Cl, то практически все методы, направленные на уменьшение скорости разрушения O_3 в стратосфере, связаны либо с воздействиями, нейтрализующими атомарный Cl [16, 17], либо приводящими к разрушению отдельных CFC's в тропосфере [18—20] с целью уменьшения концентрации хлора в стратосфере. Анализ этих методов был проведен в [21]. Здесь лишь отметим, что для разрушения CFC's предлагается использовать излучение перестраиваемого ИК-лазера [18] либо локализованные СВЧ-разряды с относительно большой концентрацией электронов, зажигаемые на высотах 10—12 км [19].

К сожалению, все эти методы не являются экологически чистыми. Во-первых, предполагается, что продукты разложения CFC's будут выпадать на Землю в виде кислотных дождей, во-вторых, в результате их использования на границе тропосферы и стратосферы будет образовываться свободный Cl, который при взаимодействии с OH конвертируется в HCl. В холодных областях атмосферы OH превращается в лед и активно участвует в гетерогенном цикле разрушения O_3 (реакции 1.49, 1.50). В случае использования для очистки атмосферы от CFC's локализованных разрядов наличие (как и в любом разряде) достаточно быстрых электронов может привести к иницированию целого комплекса плазмохимических реакций и, в частности, к образованию оксидов азота (NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_5) и других азотистых соединений (HNO_2 , HNO_3 , HNO_4), участвующих в каталитических циклах уничтожения O_3 . Еще одним отрицательным фактором при подобном воздействии является образование в атмосфере многозарядных ионов, которые являются весьма активными центрами конденсации и способствуют образованию аэрозолей, участвующих в гетерогенных циклах разрушения озона.

Следует отметить, что эти методы принципиально не позволяют проводить очистку не только от всех веществ, разрушающих озоновый слой, но и от ряда галокарбонов ($C_2Cl_2F_3$, $C_2Cl_2F_4$, CH_3Cl , $СВгF_3$, CH_3Br и др.), уже находящихся в атмосфере.

Другим направлением, позволяющим изменить концентрацию O_3 в стратосфере, является разработка методов воздействия, приводящих к увеличению скорости образования озона. Самый очевидный способ воздействия заключается в облучении воздуха УФ-излучением с целью фотодиссоциации O_2 и последующим образованием озона в соответствии с циклом Чепмена. В соответствии с реакциями (1.4), (1.5) увеличение числа квантов УФ-излучения в диапазоне $\lambda = 175-242$ нм должно привести к увеличению концентрации атомарного кислорода и ускорению образования молекул O_3 . В качестве источника УФ-излучения предполагается использовать лазер с солнечной накачкой [21]. Однако применение этого метода для компенсации разрушения озона в глобальном масштабе сопряжено с огромными энергетическими затратами (его энергетика должна быть сопоставима с солнечной).

Другим известным источником озона является электрический разряд, приводящий к образованию атомарного кислорода при диссоциации молекул O_2 электронным ударом. Этот способ производства O_3 более эффективен. В связи с этим в популярной литературе обсуждался вопрос о латании "озоновых дыр" путем наработки O_3 в определенных областях атмосферы при помощи СВЧ-разрядов или специального озонатора, установленного на борту летательного аппарата, курсирующего на высотах 17—25 км в течение достаточно длительного времени. Но этому способу присущи все недостатки, связанные с протеканием в области разряда побочных плазмохимических реакций, которые обсуждались нами ранее; его энергетическая эффективность также недостаточна для производства O_3 в количестве, необходимом для компенсации его потерь в стратосфере.

Представляется очевидным, что без прямого использования энергии Солнца все попытки компенсировать в стратосфере разрушаемый антропогенным воздействием озон неэффективны. Предложенный нами способ направлен на более эффективное использование солнечной энергии для увеличения скорости образования озона в стратосфере. Суть этого способа заключается в том, чтобы интенсифицировать процесс фотодиссоциации молекул O_2 солнечным излучением [23]. Известно, что скорость фотодиссоциации на некоторой высоте z и при зенитном угле Солнца χ определяется следующим соотношением:

$$J(z, \chi) = \int_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} I_0(\lambda) \sigma(\lambda) \varphi(\lambda) \tau(\lambda, z, \chi) d\lambda, \quad (2.1)$$

где $I_0(\lambda)$ — внеатмосферный поток солнечной радиации;

$\sigma(\lambda)$ — сечение поглощения излучения;

$\varphi(\lambda)$ — квантовый выход реакции;

$\tau(\lambda, z, \chi)$ — функция пропускания атмосферы на высоте z при зенитном угле Солнца χ .

Из (2.1) видно, что увеличения $J(z, \chi)$ можно достигнуть, увеличив либо поток солнечной радиации, либо сечение поглощения, либо функцию пропускания. На первый взгляд это сделать невозможно. Однако если вспомнить, что фотодиссоциация O_2 происходит не только из основного состояния, но и из возбужденных состояний $a^1 \Delta_g$ и $b^1 \Sigma_g^+$ — процессы (1.6)—(1.16), а, зависимости $\sigma(\lambda)$ при этом оказываются сдвинутыми в более длинноволновую область по сравнению с сече-

ниями процессов фотодиссоциации (1.2)—(1.5) (величина $I_0(\lambda)$ в этой спектральной области в 10^2 — 10^5 раз больше), то вывод становится очевидным. Для увеличения скорости фотодиссоциации O_2 необходимо получить в стратосфере достаточное количество возбужденных молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$.

Заметим, что для возбуждения молекулы O_2 в состояние $a^1\Delta_g$ требуется в шесть раз меньше энергии (всего 0,98 эВ), чем для ее прямой фотодиссоциации в процессе (1.5). Укажем также на то, что изменение частотного диапазона в сторону больших λ при фотодиссоциации $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ приводит и к увеличению величины $\tau(\lambda, z, \chi)$. Действительно, в области континуума Герцберга для $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ находится максимум поглощения O_3 в полосе Хартли, поэтому интенсивность солнечной радиации в этом интервале спектра быстро уменьшается с высотой z . Для $\lambda = 240$ — 300 нм и $\lambda = 275$ — 356 нм, отвечающим континууму Герцберга для $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, величина $\tau(\lambda, \chi, z)$ определяется в основном поглощением O_3 в полосах Хеггинса, где сечение поглощения меньше (\sim в 50 раз), чем в полосе Хартли, и $\tau(\lambda, \chi, z) \sim 1$ (в обычных условиях вклад в поглощение солнечной радиации $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ пренебрежимо мал). Поэтому в области континуума Герцберга $J(z, \chi)$ для $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ больше соответствующих значений для $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ при $z = 20$ — 60 км и $\chi = 0$ — в 10^2 — 10^4 раз.

Система полос Шумана-Рунге и часть континуума Шумана-Рунге для $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ находятся в той области спектра, где $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ слабо поглощает в континууме Герцберга, и соответствующие сечения $\sigma_i(\lambda)$ ($i = a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g^+$) на несколько порядков больше сечения для $i = X^3\Sigma_g^-$ (см. рис. 3). Изменение интенсивности потока солнечного излучения в этом диапазоне длин волн обусловлено поглощением $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ в континууме Герцберга ($\lambda = 198$ — 242 нм), влиянием же поглощения $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в системе полос Шумана-Рунге на величину $\tau(\lambda, \chi, z)$ можно пренебречь вплоть до $H = 60$ км. Все это приводит к тому, что скорости фотодиссоциации электронно-возбужденного O_2 в рассматриваемом спектральном диапазоне существенно больше, чем $J(z, \chi)$ для $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ и остаются значительно больше суммарной скорости фотодиссоциации из состояния $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ во всем интервале высот 10—100 км.

На рис. 6 показаны взятые из работы [6] результаты расчета высотных профилей $J(z)$ при $\chi = 0$ для различных спектральных диапазонов при фотодиссоциации O_2 из состояний $X^3\Sigma_g^-$ (а), $a^1\Delta_g$ (б) и $b^1\Sigma_g^+$ (в). Отметим, что в стратосфере концентрация $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ незначительна, поэтому несмотря на большие значения $J(z, \chi)$ для этих состояний фотодиссоциацией $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ как источником атомарного кислорода вплоть до $H = 60$ км можно пренебрегать. Однако если искусственно создать значительное количество возбужденных молекул O_2 , то ситуация может в значительной степени измениться. Источником возбуждения $O_2(a^1\Delta_g)$ может быть лазер ИК-диапазона ($\lambda \approx 1,27$ мкм), а $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ — видимого диапазона ($\lambda \approx 762$ нм) [23] или специально организованный электрический разряд [24]. В случае воздействия лазерного излучения

кинетическая схема, помимо реакций (1.1)—(1.24), должна включать следующие процессы:

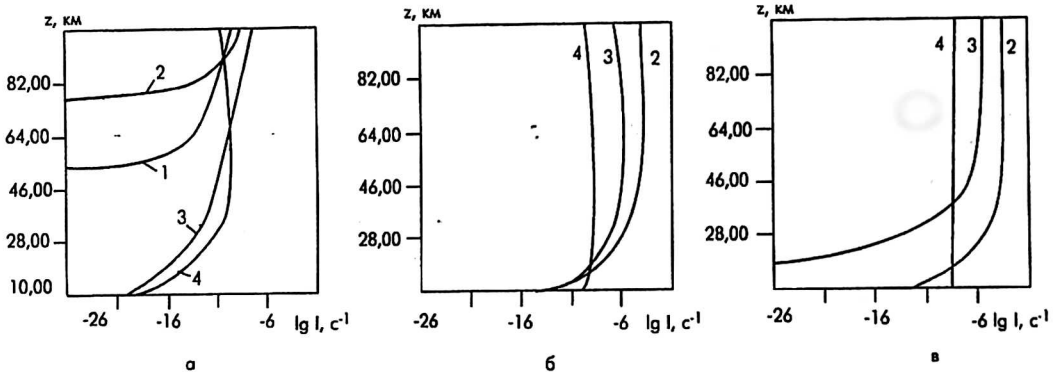
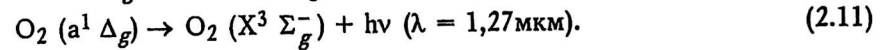
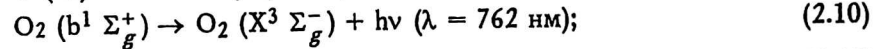
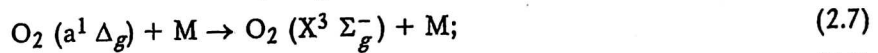
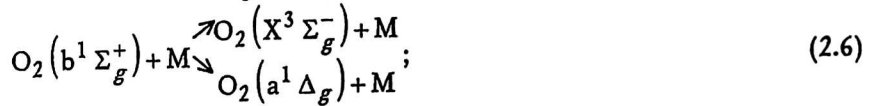
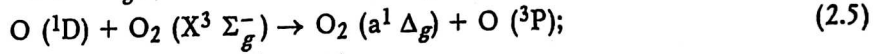
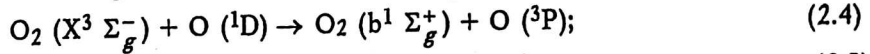
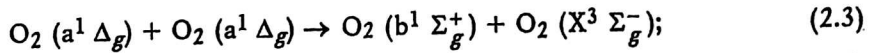
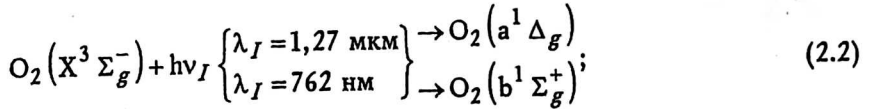


Рис. 6. Высотные профили скоростных коэффициентов фотодиссоциации O_2 из состояний $X^3 \Sigma_g^-$ (а), $a^1 \Delta_g$ (б) и $b^1 \Sigma_g^+$ (в) для спектральных диапазонов, отвечающих серии Лаймана (1), континууму Шумана-Рунге (2), полосам Шумана-Рунге (3), континууму Герцберга (4)

Используя численное моделирование, покажем, что при резонансном возбуждении O_2 излучением с $\lambda = 1,27$ мкм можно при определенных условиях добиться значительного увеличения скорости образования O_3 в атмосфере, причем даже в том случае, когда характерные времена столкновительных процессов (1.21), (1.22) и (2.5)—(2.8) существенно меньше времени процессов фотодиссоциации из состояний $\text{O}_2(a^1 \Delta_g)$ и $\text{O}_2(b^1 \Sigma_g^+)$.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим простейшую модельную смесь $\text{O}-\text{O}_2-\text{O}_3$, на которую действует излучение с частотой ν_I , резонансной частотой электронно-колебательного перехода молекулы O_2 $m(X^3 \Sigma_g^-, \nu, j', K') \rightarrow n(a^1 \Delta_g, \nu'', j'', K'')$, где ν' и ν'' — коле-

бательные, j' , K' и j'' , K'' — вращательные квантовые числа в электронных состояниях $X^3 \Sigma_g^-$ и $a^1 \Delta_g$.

Напомним, что оптические переходы между состояниями $X^3 \Sigma_g^-$ и $a^1 \Delta_g$ запрещены правилами отбора. Однако спин-орбитальное взаимодействие ведет к появлению линий поглощения, разрешенных в магнитно-дипольном приближении. При этом в состоянии $a^1 \Delta_g$ вращательные уровни проявляются только при $j'' = K'' \geq 2$, а в состоянии $X^3 \Sigma_g^-$ каждый вращательный уровень с квантовым числом K' состоит из трех спиновых компонентов $j' = K' + 1$, $j' = K'$ и $j' = K' - 1$ [25, 26].

Из изложенного выше видно, что кинетика процессов даже в такой простой атомно-молекулярной системе достаточно сложна. Однако, как показал анализ, для описания процессов в нижней атмосфере ($H < 30$ км) можно использовать упрощенную кинетическую схему, учитывающую только реакции с участием $O(^3P)$, $O_2(X^3 \Sigma_g^-)$, $O_2(a^1 \Delta_g)$ и O_3 , полагая, что времена тушения состояний $O_2(b^1 \Sigma_g^+)$, $O(^1D)$ существенно меньше всех остальных процессов, а заселенности электронно-возбужденных устойчивых состояний $O_2: A^3 \Sigma_u^+, C^3 \Delta_u, C^1 \Sigma_u^-, ^1 \Delta_u, \alpha^1 \Sigma_u^+$ и состояния $O(^1S)$ пренебрежимо малы. В табл. 4 даны реакции, вошедшие в эту схему. Здесь же приведены константы столкновительных процессов K_j и скорости процессов фотодиссоциации j_b , выбранные на основе рекомендаций [1—3, 6, 24—27], и значения характерных времен этих процессов при $H = 20$ км. Скорость индуцированных переходов W_I определялась по соотношению

$$W_I = \sigma_{mn} I/h\nu_I, \quad \sigma_{mn} = \frac{\lambda_{mn}^2}{4\pi b_D} A_{mn} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} H(x, a),$$

- где I — интенсивность лазерного излучения;
 λ_{mn} — длина волны в центре линии;
 A_{mn} — коэффициент Эйнштейна поглощающего перехода $m \rightarrow n$;
 b_D — доплеровская ширина спектральной линии на полувысоте;
 $H(x, a)$ — функция Фойхтга.

Таблица 4

Кинетическая схема процессов в смеси $O-O_2-O_3$

№ п/п	Реакция	K_j (J_k), c^{-1} ($(cm^3)^{n-1}/c$)	Ис-точ-ник	τ_p , с ($H = 20$ км)
1	$O_3 + hv$ ($198 \text{ нм} < \lambda < 610 \text{ нм}$) $\rightarrow O_2(^1\Delta_g) + O(^3P)$	J_1	[2, 6]	$2,92 \cdot 10^3$
2	$O_3 + hv$ ($610 \text{ нм} \leq \lambda \leq 730 \text{ нм}$) $\rightarrow O_2(^3\Sigma_g^-) + O(^3P)$	J_2	[6]	$1,13 \cdot 10^4$
3	$O_2(^3\Sigma_g^-) + hv$ ($198 \text{ нм} < \lambda < 242 \text{ нм}$) $\rightarrow O(^3P) + O(^3P)$	J_3	[2, 6]	$1,76 \cdot 10^{12}$
4	$O_2(^1\Delta_g) + hv$ ($220 \text{ нм} \leq \lambda \leq 320 \text{ нм}$) $\rightarrow O(^3P) + O(^3P)$	J_4	[3, 6]	$3,28 \cdot 10^8$
5	$O_2(^3\Sigma_g^-) + hv_1$ ($\lambda = 1,27 \text{ мкм}$) $\rightarrow O_2(^1\Delta_g)$	$W_I \left(I = 50 \frac{Вт}{cm^2} \right)$		2,01
6'	$O_3 + O(^3P) \rightarrow O_2(^1\Delta_g) + O_2(^3\Sigma_g^-)$	$0,9 \cdot 10^{-11} \exp\left(-\frac{2300}{T}\right)$	[24]	$2,5 \cdot 10^{-3}$
6''	$O_3 + O(^3P) \rightarrow 2O_2(^3\Sigma_g^-)$	$0,9 \cdot 10^{-11} \exp\left(-\frac{2300}{T}\right)$	[24]	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 4

№ п/п	Реакция	$K_i (J_k), c^{-1}$ ($(cm^3)^{n-1} / c$)	Ис- точ- ник	τ_p, c ($H = 20 км$)
7	$O_3 + O_2 (^1\Delta_g) \rightarrow 2O_2 (^3\Sigma_g^-) + O (^3P)$	$5,22 \cdot 10^{-11} \exp\left(-\frac{2840}{T}\right)$	[27]	$5,22 \cdot 10^{-3}$
8	$O_2 (^1\Delta_g) + M \rightarrow O_2 (^3\Sigma_g^-) + M$	$M = O_2 - 1,7 \cdot 10^{-18}$ $M = O_3 - 4 \cdot 10^{-15}$ $M = O - 1,6 \cdot 10^{-16}$	[27] [27] [24]	0,31 $1,35 \cdot 10^{-4}$ $3,4 \cdot 10^{-3}$
9'	$O (^3P) + O (^3P) + M \rightarrow O_2 (^3\Sigma_g^-) + M$	$1,9 \cdot 10^{-30} \cdot T^{-1} \exp\left(-\frac{170}{T}\right)$	[24]	$7,32 \cdot 10^{-5}$
9''	$O (^3P) + O (^3P) + M \rightarrow O_2 (^1\Delta_g) + M$	$1,9 \cdot 10^{-30} \cdot T^{-1} \exp\left(-\frac{170}{T}\right)$	[24]	$7,32 \cdot 10^{-5}$
10	$O (^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$6,2 \cdot 10^{-34} \left(\frac{T}{300}\right)^{-1,25}$	[27]	$3,14 \cdot 10^{-4}$
11	$O_2 (^1\Delta_g) \rightarrow O_2 (^3\Sigma_g^-) + h\nu (\lambda = 1,27 \text{ мкм})$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	[9]	$3,88 \cdot 10^3$

Для простоты будем полагать, что на рассматриваемых временных интервалах между колебательными, вращательными и поступательными степенями свободы молекул существует термодинамическое равновесие. При этом систему уравнений, описывающих процессы (1)–(12), можно представить в виде:

$$\frac{dN_1}{dt} = -J_3 N_1 + J_2 N_3 - W_I \left(\frac{g_n}{g_m} N_m - N_n \right) + W_s N_2 + 2K_6'' N_3 N_4 + K_6' N_3 N_4 + 2K_7 N_3 N_2 + K_9 N_4^2 N - K_{10} N_1 N_4 N + K_{11} N N_3 + N_2 \sum_M K_8^M N_M; \quad (3.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -J_4 N_2 + W_I \left(\frac{g_n}{g_m} N_m - N_n \right) - W_s N_2 + J_1 N_3 + K_6' N_3 N_4 - K_7 N_3 N_2 + K_9'' N_4^2 N - N_2 \sum_M K_8^M N_M; \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -(J_1 + J_2) N_3 - K_6 N_3 N_4 - K_7 N_3 N_2 + K_{10} N_1 N_4 N - K_{11} N N_3; \quad (3.3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = 2J_3 N_1 + 2J_4 N_2 + (J_1 + J_2) N_3 - 2K_9 N_4^2 N - K_6 N_3 N_4 + K_7 N_3 N_2 - K_{10} N_1 N_4 N + K_{11} N N_3. \quad (3.4)$$

Здесь N_i — плотность частиц i -го сорта ($i = 1 - O_2 (^3\Sigma_g^-)$; $i = 2 - O_2 (a^1\Delta_g)$; $i = 3 - O_3$; $i = 4 - O (^3P)$);

N_m, N_n — плотность молекул O_2 в состояниях m и n поглощающего перехода;

g_m и g_n — кратности их вырождения;

$$N = \sum_{i=1}^4 N_i, \quad K_6 = (K_6' + K_6''), \quad K_9 = (K_9' + K_9'').$$

Анализ динамики поведения $N_i(t)$ будем проводить, полагая, что плотность смеси не меняется во времени. Рассмотрим условия, когда в области воздействия $\tau_u \gg \tau_D, \tau_T, \tau_K$, где τ_u — длительность воздействия, τ_D, τ_T, τ_K — характерные

времена диффузии, теплопроводности и конвекции, пренебрегая при этом изменением температуры в зоне воздействия излучения. Начальные условия соответствуют атмосферным на данной высоте, а изменение потока солнечного излучения моделируется изменением оптической толщины атмосферы [8, 9]. Значения J_i ($i = 1-4$) вычислялись с учетом Рэлеевского рассеивания и изменения концентрации основных поглощающих компонентов (O_2 и O_3) по высоте [1], t_0 — момент начала воздействия ($I = 0$ при $t < t_0$ и $I = I_0$ при $t_0 \leq t < t_0 + \tau_u$).

Воздействие излучения с $\lambda_1 \approx 1,27$ мкм в значительной степени изменяет кинетику процессов в атмосфере. Это иллюстрирует рис. 7, на котором представлены скорости образования и разрушения $O(^3P)$ (а) и O_3 (б) — S_i ($S_1 = (J_1 + J_2) N_3$, $S_3 = J_3 N_1$, $S_4 = J_4 N_2$, $S_6 = K_6 N_3 N_4$, $S_7 = K_7 N_3 N_2$, $S_9 = K_9 N_4^2 N$, $S_{10} = K_{10} N_1 N_4 N$, $S_{11} = K_{11} N_3 N$), полученные при численном решении уравнений (3.1)–(3.4) при воздействии излучения с частотой, соответствующей частоте перехода с $v' = v'' = 0$, $j' = 4$, $j'' = 3$, $K' = K'' = 3$, $I = 50$ Вт/см², $\tau_u = 5$ ч, на смесь O_2-O_3-O в условиях атмосферы при $H = 20$ км, спустя 3 ч после восхода Солнца на экваторе ($t_0 = 8$ ч 41 мин). Отметим, что, помимо ускорения реакции фотодиссоциации (см. табл. 4, № 4), воздействие лазерного излучения приводит к ускорению реакции (см. табл. 4, № 7), продуктом которой является атомарный кислород, т. е. эта реакция дает вклад как в разрушение, так и в образование O_3 (в присутствии лазерного излучения роль этой реакции в ускорении образования $O(^3P)$ резко возрастает).

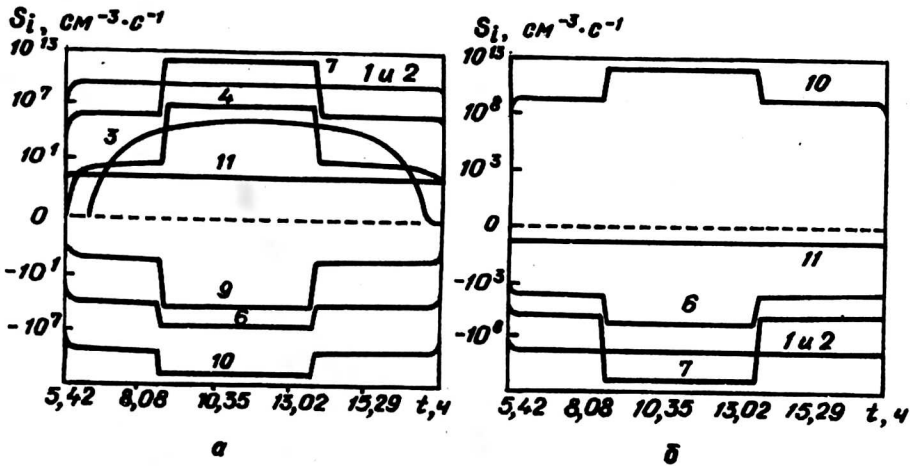


Рис. 7. Изменение скоростей образования и разрушения $O(^3P)$ (а) и O_3 (б) в модельной смеси ($H = 20$ км) при воздействии лазерного излучения с $\lambda_1 = 1,27$ мкм и $I = 50$ Вт/см² (цифры 1–11 соответствуют реакциям из табл. 4)

Скорости образования и разрушения озона при воздействии лазерного излучения зависят от W_I , τ_u и t_0 . Скорость индуцированных переходов W_I определяет интенсивность наработки возбужденных молекул $O_2(a^1\Delta_g)$, длительность импульса τ_u — количество этих молекул по истечении воздействия, время начала воздействия t_0 — зенитный угол, а следовательно, и величину J_4 . На рис. 8 представлены результаты численного расчета изменения плотности молекул озона O_3 на высоте 20 км при воздействии излучения с разными I и t_0 при $\tau_u = 5$ ч. Видно, что при t_0 , мало отличающемся от времени восхода Солнца ($t_* = 5$ ч 41 мин), воздействие излучения приводит сначала к уменьшению концентрации O_3 (см. рис. 8, кривая 2), что объясняется разрушением озона в реакции (см. табл. 4, № 7), поскольку скорость фотодиссоциации $O_2(a^1\Delta_g)$ в это время пренебрежимо

мала. Однако в дальнейшем, когда величина J_4 возрастает, по истечении некоторого промежутка времени после начала воздействия наблюдается увеличение концентрации O_3 . С ростом t_0 ($t_0 > t_*$) вследствие увеличения потока солнечного излучения, а следовательно, и J_4 , воздействие лазерного излучения приводит к увеличению N_3 и может значительно превышать концентрацию O_3 в атмосфере при отсутствии воздействия (см. рис. 8, пунктирная линия).

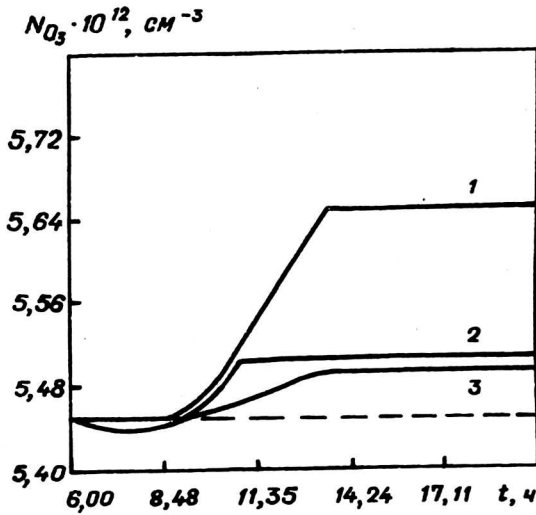


Рис. 8. Изменение во времени плотности молекул O_3 при воздействии излучения с $\lambda_1 = 1,27$ мкм, $I = 10$ Вт/см² (1, 2) и 2 Вт/см² (3)

Из приведенных результатов следует существование некоторой области параметров (t_0 , τ_u , W_I), при которых возможно существенное увеличение скорости образования O_3 в атмосфере при воздействии резонансного ИК-излучения с $\lambda \approx 1,27$ мкм. Следует также отметить, что возбужденный в состоянии $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ молекулярный кислород весьма интенсивно разрушает CFC's [20] O_2 ($a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$) + $CF_mCl_n \rightarrow CF_mCl_{n-1} + ClO_2$, т. е. приводит одновременно и к уменьшению скорости разрушения озона.

К сожалению, все предлагаемые методы активного воздействия на атмосферу не вышли пока за рамки предварительных оценок. Их количественный анализ связан с необходимостью проведения комплекса фундаментальных и прикладных исследований по физике элементарных процессов с участием возбужденных атомов и молекул, распространению лазерного излучения в резонансно-поглощающих газовых средах, физике низкотемпературной плазмы, гетерогенной химии, динамическим и радиационным процессам в атмосфере, лазерной физике, космической энергетике и др.

Таким образом, технотронная деятельность, не принимающая во внимание природные процессы, может поставить человечество на грань глобальной экологической катастрофы. По-видимому, международное сообщество должно быть готово к использованию наряду с пассивными и активных методов воздействия на атмосферу. Поэтому вопрос об эффективности и экологической безопасности этих методов требует детальной и весьма глубокой проработки, в связи с чем открывается широкое поле деятельности для представителей самых различных разделов науки и техники.

Литература

1. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. — М.: Мир. 1978. — 375 с.
2. Rodrigo R., Lopez — Moreno J. J., Lopez — Puertaz M. et al. // Planet Space Sci, 1986. V. 34. № 8. P. 723—743.

3. Saxon R. P., Slinger T. G.//J. Geophys. Res, 1986. V. 91. № D9. P. 9877—9879.
4. Frederic J. E., Cicerone R. J.//Ibid, 1985, V. 90. № D6. P. 10.733—10.738.
5. Slinger T. G., Jusinski L. E., Black G., Gadd G. E.//Science. 1988. V. 241. P. 945—950.
6. Старик А. М., Таранов О. В., Пашкова О. Е. Фотодиссоциация молекулярного кислорода и озона в атмосфере//Preprint CIAM, 1995, № 24.
7. Герцберг Г. Спектры и строение двухатомных молекул. — М.: Изд-во Иностран. лит. 1949. — 403 с.
8. Chamberlain J. W.//Astrophys. J., 1958. V. 128. № 3. P. 713—717.
9. Slinger T. G.//J. Chem. Phys. 1978. V. 69. № 11. P. 4779—4791.
10. Krupenie P.//J. Phys. Chem. Ref. Data., 1972. V. 1. № 2. P. 423—534.
11. Кулагин Ю. А., Шелепин Л. А., Ярыгина В. Н. Кинетика процессов в газовых средах, содержащих метастабильный кислород//Тр. физического ин-та им. П. Н. Лебедева, 1994. Т. 218. С. 166—226.
12. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 414 с.
13. Molina M. J., Rowland F. S.//Nature, 1974. V. 249. P. 810.
14. Zelner R. Chemistry of the stratosphere. Orbital transport. Meteorological and chemical aspects. Third aerospace symposium. Ed. by Oertel H., Korner H. Springer-Verlag, 1993. P. 399—415.
15. Rodriguez J. M., Ko W. K. M., Sze N. D. et al.//J. Geophys. Res, 1989. V. 94. № D14. P. 16.683—16.703.
16. Cicerone R. J., Elliott S., Turco R. P.//Science, 1991. V. 254. P. 1191—1194.
17. Wong A. Y., Steinhauer J., Close R. et al. Comm. plasma. Phys. Contr. Fusion, 1989. V. 12. P. 235.
18. Stix T. H.//J. Appl. Phys., 1989. V. 66. № 11. P. 5622—5626.
19. Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Бархударов А. Э. и др.// Физика плазмы, 1992. Т. 18. Вып. 9. С. 1198—1210.
20. Колесниченко Ю. Ф., Хмара Д. В.//Письма в ЖТФ, 1993. Т. 19. № 10. С. 36—40.
21. Старик А. М. О проблеме сохранения озонового слоя Земли//Preprint CIAM, 1994. № 19.
22. Avnik D., Ludlow D. K., Stciaberger E. H. On replenishing the depleted ozone by its photogeneration in the stratosphere. Heterogeneous chemistry reviews. Ed. by Avnik D. Wiley. Jerusalem, 1994.
23. Starik A. M., Favorski O. N., Khabarov O. S., Amelin B. N. Herald of the Russian Academy of Science, 1993. V. 63. № 12. P. 894—900.
24. Захаров А. И., Клоповский К. С., Осипов А. П. и др.//Физика плазмы, 1988. Т. 14. № 3. С. 327—333.
25. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.//Квантовая механика. Т. 3 — М.: Наука, 1974.
26. Amiot G., Verges J.//J. Can. Phys., 1981. V. 59. № 9. P. 1391—1398.
27. Baulch D. C., Cox R. A., Hampson R. F. et al.//J. Phys. Chem. Ref. Data, 1984. V. 13. № 4. P. 1259—1380.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект: 93-02-16114).

ABOUT PROBLEM OF OZONE LAYER PRESERVATION AT CONTINUING ANTROPOGENICAL ATMOSPHERE POLLUTION

A. M. Starik

The central institute of aircraft engines, Moscow, Pussia

This article is devoted to the global ecological problem — the world ozone layer preservation. The analysis of various passive and active methods of the ozone restoration in top atmosphere layers is conducted. The original method of restoration, based on more effective use the sun energy for increase of ozone formation speed in stratosphere, is offered owing to achievement of laser and space engineering.