

**Г. А. Аскарьян, Г. М. Батанов, И. А. Косый, А. Ю. Костинский.**  
 Последствия СВЧ-разрядов в стратосфере. В последнее время все интенсивнее ведутся исследования возможности создания плазменного зеркала в стратосфере для ретрансляции радио- и телепередач на

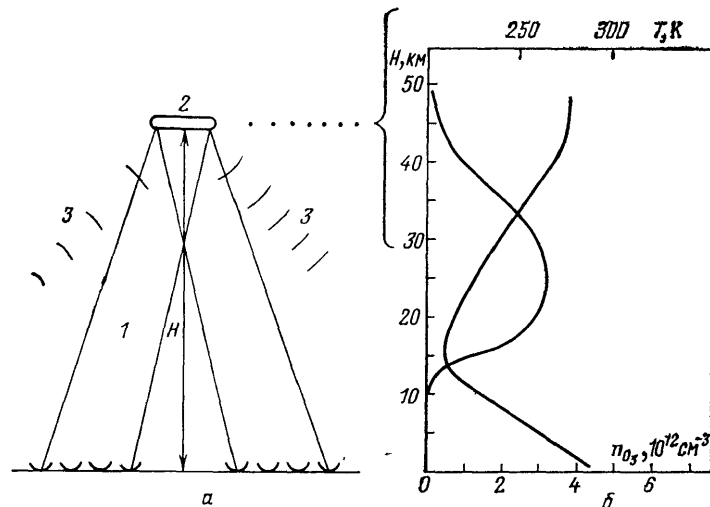


Рис. 1. Лучи, плазменное зеркало (а) и распределение концентрации озона и температуры (б) (1 — СВЧ лучи, создающие плазменное зеркало 2; 3 — ретранслируемое излучение)

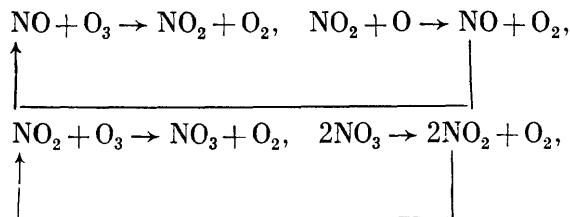
большие расстояния. Этому вопросу посвящены десятки статей, обзор <sup>1</sup> и монография <sup>2</sup>, в которых этот вопрос исследован наиболее обстоятельно. Предлагается на высотах 30 — 60 км зажечь СВЧ разряд в скрещенных СВЧ лучах (рис. 1, а), поддерживая разряд, обеспечить сильное отражение волн метрового диапазона.

Однако авторы не учли, что именно на этих высотах находится существенная часть озонного слоя (см. рис. 1, б и <sup>3</sup>), защищающая все живое на Земле от ультрафиолетового излучения в диапазоне  $(2-3) \cdot 10^3 \text{ \AA}$  (так называемая полоса Хартли), которое свободно проходит через воздух, но сильно поглощается слоем озона. Достаточно сказать, что даже малые уменьшения «мощности» озонного слоя приводят к сильным увеличениям числа заболеваний рака кожи, мутациям и другим вредным биологическим эффектам.

В настоящее время защита озонного слоя является одной из глобальных задач в связи с нарастающим загрязнением от промышленности, бытовых фреонных загрязнений, ракетных двигателей лайнеров и ракет. Загрязнения в виде оксидов азота, хлора, фтора являются катализаторами процесса

уничтожения молекул озона, причем на одну молекулу катализатора приходится от тысячи до сотни тысяч уничтоженных молекул озона.

Наши исследования показали, что в длительных СВЧ-разрядах происходит столь обильное производство оксидов азота  $\text{NO}_x$ , что в районе ретрансляции должна образоваться зона сильного истощения озонного слоя. Во время СВЧ-разряда происходит под действием электронных ударов интенсивное возбуждение молекул азота  $\text{N}_2^*$  ( $v \geq 12$ ) и диссоциация кислорода, что сразу дает образование  $\text{NO}$  в реакции  $\text{N}_2^* + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$  и др. \*). Окись азота и последующие оксиды вступают в реакции с озоном,



в которых сразу видна каталитичность действия  $\text{NO}_x$ . Введем коэффициент каталитичности  $\eta$ , который мы определим как отношение (изменения) концентрации озона к (изменению) концентрации оксидов азота, существенно влияющей на озон. Для усредненных балансных условий концентрация  $[\text{O}_3] \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;  $[\text{NO}_x] \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$  и  $\eta \approx 10^3$  и для малых изменений  $\Delta n_{\text{O}_3} \approx 10^3 \Delta n_{\text{NO}_x}$  для больших изменений  $n_{\text{O}_3} \approx A/n_{\text{NO}_x}^\alpha$ , где  $\alpha \approx 1/2$ .

Наращение числа оксидов  $\dot{N} \approx P_{\text{ср}}/\epsilon$ , где  $P_{\text{ср}}$  — средняя мощность энерговыделения в разряде,  $\epsilon$  — энергетическая «цена» образования одной молекулы  $\text{NO}_x$ . При  $P_{\text{ср}} \approx \text{МВт}$  и  $\epsilon \approx 10^2 \text{ эВ}$  получим  $\dot{N} \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ мол/час} \approx 20 \text{ кг/час}$ , что при  $\eta \approx 10^3$  и мощности озонного слоя  $N_{\text{O}_3/\text{см}^2} \approx 10^{12} \times 10^6 \approx 10^{18} \text{ мол/см}^2$  может создать дыру в слое радиусом  $R \approx (\eta \dot{N} t / \pi N_{\text{O}_3/\text{см}^2})^{1/2} \approx 3 \text{ км}$  за 1 час разряда. В случае ветра со скоростью  $u$  площадь шлейфа  $s = 2au$  и условие уничтожения озонного слоя  $\eta P_{\text{ср}}/\epsilon \approx 2au N_{\text{O}_3/\text{см}^2}$ , что также выполняется для  $P_{\text{ср}} \approx \text{МВт}$ ,  $a \approx 10^2 \text{ м}$  даже при  $u \approx 10^2 \text{ м/с}$ . Эти оценки исходили из условия сильного изменения мощности озонного слоя, но в ряде случаев (особенно при малых широтах) недопустимо даже его малое изменение. Отметим, что объем расширения гибели озонного слоя по вертикали обеспечивается конвекцией, вихрями и вертикальными потоками вверх и вниз, которые присутствуют в стратосфере, причем времена поперечной диффузии не меньше времени перемешивания по вертикали (так как эффективные коэффициенты диффузии  $D_\perp \ll D_{\text{вертик}}$ ).

Были поставлены эксперименты по исследованию динамики производства оксидов азота и озона в СВЧ-разряде в широком диапазоне температур и давлений. Поток СВЧ мощностью 200 кВт в импульсе длительностью 10 мкс и частотой повторения 2 Гц фокусировался в стеклянную камеру с кварцевыми окнами, заполненную исследуемым газом и просвечиваемую светом ртутной лампы. Нарботка  $\text{NO}_2$  бурого цвета измерялась по поглощению видимого излучения, наработка озона — по линии в ультрафиолете. Спектр раскладывался монохроматором, и линии фиксировались ФЭУ. На рис. 2 показана наработка  $\text{NO}_2$  при разных начальных давлениях воздуха от 75 до 760 торр. Характерно, что наработка продолжалась и после выключения СВЧ (при 1000 с) из-за продолжения реакций  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}$ . Никаких следов озона не было замечено на уровне  $> 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , хотя в кислороде сразу была замечена наработка озона. Это показывало, что в воздухе, если озон и

\*) При больших электронных температурах будет существенна также диссоциация и азота через электронное возбуждение молекулы с последующей реакцией  $\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ .

появлялся, он уничтожался оксидами азота, которые производились в большом количестве: вся колба заполнялась бурым газом. Эта наработка не менялась от температуры. При низких температурах ( $\sim 120$  К), гораздо ниже, чем в стратосфере, в воздухе был после разморозки зарегистрирован озон. Само по себе появление оксидов может существенно изменить температурный режим в стратосфере и на Земле из-за перехвата солнечного света («СВЧ зима»).

Отметим, что вредные последствия связаны с длительными разрядами, необходимыми для длительной ретрансляции передач. Однако в импульсном режиме (короткие посылки, спрессованные передачи) вред от таких зеркал может быть значительно уменьшен. Интересно отметить, что для однократных

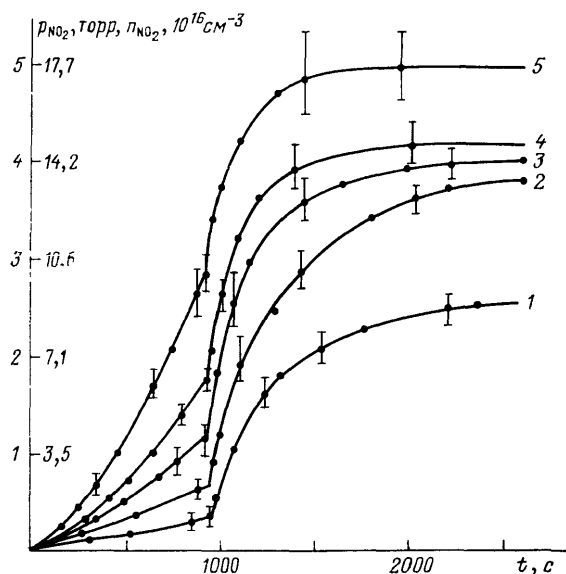


Рис. 2. Нарработка окиси азота во времени при разных начальных давлениях воздуха (в торрах): 75 (1), 112,5 (2), 150 (3), 185 (4) и 300 (5) (излом кривых при выключении генератора;  $t \approx 10^3$  с)

коротких импульсов может повыситься наработка озона. Небольшое увеличение оксидов азота может связать хлор- и фторсодержащие соединения в стойкие, не участвующие в каталитическом цикле.

Основной вывод — необходимо с большой осторожностью относиться к СВЧ разрядам в стратосфере. Длительные мощные разряды и их пропаганду следует запретить наряду с запретом полетов лайнеров в стратосфере и запретом фреонной бытовой химии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // УФН. 1980. Т. 132. С. 685.
2. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная ионизованная область в атмосфере. — М.: ИЗМИРАН АН СССР, 1986.
3. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. — М.: Мир, 1981.
4. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.