ставляющими вблизи обеих частот C и C_1, существующий до установления синхронного режима в области синхронизации около частоты C. Спектр многочастотного «бигармонического» режима приведен на рис. 3, *а*. При $C<p<C_1$, если $p\neq(C+C_1)/2$, влияние внешнего воздействия асинхронно и возникают более или менее сложные многочастотные «бигармонические» спектры. При $p\approx(C+C_1)/2$ возникает сильное комбинационное взаимодействие внешнего воздействия с возможными колебаниями генератора. Происходит взаимная перекачка энергии, существенное увеличение амплитуды вынужденных колебаний с частотой p, уменьшение амплитуд составляющих с частотами $\omega_1\approx C_1$ и $\omega_2\approx C$ (рис. 3, *б*) и возникновение комбинационной синхронизации при сохранении точного соотношения $(\omega_1+\omega_2)/2=p$ в некоторой области перестроек p.

Полученные закономерности зависимостей спектров многочастотных режимов от параметров системы и воздействия качественно аналогичны закономерностям взаимодействий неавтономных связанных генераторов, имеющих различные степени регенерации и парциальные частоты ω_1 и ω_2.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Минакова И. И., Панов В. И.//Радиотехн. и электроника. 1988. 33, № 8. С. 1696. [2] Дворников А. А., Огурцов В. И., Уткин Г. М.//Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М., 1983. [3] Кислов В. Я., Мясин Е. А., Залогин Н. Н.//Радиотехн. и электроника. 1980. 25, № 10. С. 2160. [4] Минакова И. И., Симеонова Б. Г.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1985. 26, № 5. С. 40.

Поступила в редакцию
15.06.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 2

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.510.534

ЗНАЧЕНИЕ ВОЗБУЖДЕННЫХ МОЛЕКУЛ АЗОТА ДЛЯ СТРОЕНИЯ ОЗОНОСФЕРЫ

М. Н. Бидниченко, А. Х. Хргиан

(кафедра физики атмосферы и математической геофизики)

Показано, что механизм образования окиси азота NO в средней атмосфере с участием возбужденных частиц $N(^2D)$ и $N_2(A^3\Sigma_n{}^+)$ может реально привести к наблюдаемым в полярных сияниях высоким значениям концентрации NO и к существенной убыли мезосферного озона.

Как известно, свойства и изменения количества атмосферного озона привлекают особое внимание, поскольку он влияет на развитие биосферы Земли. Поэтому важно учитывать все факторы, в том числе и космические, могущие влиять на количество озона.

Концентрация озона в мезосфере зависит существенно от наличия там окиси азота NO, которая разрушает озон, превращаясь в двуокись NO_2. Количество частиц NO на высоте 85 км составляет, в зависимости от солнечной активности, от $5\cdot10^5$ [1] до $5\cdot10^7$ см$^{-3}$ [2]. Для практических оценок принимали поэтому значение концентрации NO, равное $1\cdot10^7$ см$^{-3}$ [2].

Однако по данным ракетных зондирований [2, 3] на высотах 80—120 км в полярной атмосфере при вторжении энергичных космических частиц концентрация NO может достигать 10^9—10^{10} см$^{-3}$. Это явление не находило объяснения в рамках прежних фотохимических теорий, учитывавших только невозбужденные частицы.

Спектры полярных сияний показали, что на высоте 80—120 км содержится много метастабильных молекул и атомов азота, находящихся в первом возбужденном состоянии — $N(^2D)$ и $N_2(A^3\Sigma_u{}^+)$.

По предположению Прасада [4] и Нортона и Барта [5], реакции образования NO с участием этих частиц являются наиболее вероятным источником большого количества азотных окислов в атмосфере (табл. 1).

Таблица 1

Реакции азотных составляющих в мезосфере

Реакция	Константа скорости, $см^3 \cdot с^{-1}$
$N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O$	7,0(—12)
$N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2 \rightarrow N_2O + O(^3P, {}^1D)$	8,0(—12)
$N_2O + O(^1D) \rightarrow 2NO$	7,2(—11)
$N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$	1,1(—9)
$N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$	2,5(—10)
$N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$	1,1(—11)

Примечание. 7,0(—12) означает $7{,}0 \cdot 10^{-12}$ и т. д.

По Томасу [6], скорость образования NO из $N(^2D)$ ограничена и содержание NO не должно превышать 10% концентрации O_2 на той же высоте. Поскольку наблюдения указывают на бо́льшее содержание NO, очевидно, более важна реакция, начинающаяся с $N_2(A^3\Sigma_u^+)$.

Реакции (4)—(6) — так называемые реакции «закачки энергии» — ранее в фотохимии средней атмосферы не рассматривались. Эти процессы уменьшают заселенность состояния $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, как показали наши расчеты, в 2,25 раза.

Мы рассчитали концентрацию окислов азота для высоты 85 км при участии в их образовании частиц $N(^2D)$ и $N_2(A^3\Sigma_u^+)$. Для расчета модель, предложенная Симазаки [1], была дополнена учетом реакций с упомянутыми возбужденными частицами, а также с ионными составляющими, данные о которых были заимствованы у Данилова [8, 5].

Поскольку образование частиц $N(^2D)$ и $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ путем фотовозбуждения запрещено правилами отбора для дипольного излучения, мы учли их образование при процессах вторжения энергичных электронов в области полярных сияний. Таковы диссоциативная рекомбинация ионов NO^+ и неупругое рассеяние этих авроральных электронов с энергией порядка 10 кэВ и концентрацией $[e] = 7 \cdot 10^5$ $см^{-3}$ на молекулах и атомах азота (табл. 2).

Таблица 2

Концентрация некоторых малых газовых составляющих в области полярного сияния днем на высоте 85 км при $T = 180$ К и концентрации O_2 5,8 (13) $см^{-3}$

Газ	Без учета «закачки»	С учетом «закачки»
$N_2(A^3\Sigma_u^+)$	3,9(9)	1,9(9)
N_2O	3,7(10)	5,6(10)
NO	3,9(10)	1,6(10)
O_3	7,9(—1)	4,9(—2)

Рассчитанные так концентрации окислов азота вполне соответствуют экспериментальным данным, полученным при полярных сияниях. Они на 3—5 порядков выше наблюдаемых в «спокойных условиях» — в отсутствие вторжений электронов.

Озон взаимодействует с NO по реакции

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

(константа реакции $K = 3{,}8 \cdot 10^{-12} \exp\{-1580/T$ $см^3 \cdot с^{-1}$) и при указанной в табл. 2 концентрации NO практически полностью разрушается в мезосфере—его концентрация в области сияния падает на восемь порядков. Разогрев атмосферы в области сияния еще усиливает разрушение озона.

Зависимость содержания N_2O и NO от притока электронов очень сильна. Так, например, при концентрации их $[e] = 1{,}3 \cdot 10^3$ см$^{-3}$ в «спокойных условиях» мезосферы количество окислов азота там должно быть на три порядка меньше, чем указано в табл. 2 — при сиянии. Зависимость их от галактических космических лучей (ГКЛ) и от рентгеновского излучения Солнца, однако, ничтожна (табл. 3).

Таблица 3

Скорости ионизации N_2 и O_2 различными ее источниками на высоте 85 км

Источник	N_2	O_2
Электроны с концентрацией $[e] = 7{,}0(5)$ см$^{-3}$	1,66(—2)	2,01(—2)
Электроны, $[e] = 1{,}3(3)$ см$^{-3}$	3,08(—5)	3,71(—5)
ГКЛ	3,1(—18)	3,5(—18)
Рентгеновское излучение при сильной вспышке	4,3(—13)	4,8(—13)

Расчет рентгеновского излучения сделан нами для зенитного расстояния Солнца 62°. Другие упомянутые в табл. 3 процессы не зависят почти от времени дня.

Таким образом, разрушение мезосферного озона связано с поясом полярных сияний в периоды, когда возникают эти сияния.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Shimazaki T.//J. Atm. Terr. Phys. 1984. **46**, N 2. P. 173. [2] Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М., 1977. [3] Кароль И. Л. и др. Газовые примеси в атмосфере. Л., 1983. [4] Прасад Ш.//Солнечно-земные связи, погода и климат. М., 1982. [5] Данилов А. Д., Власов М. Н. Фотохимия ионизированных и возбужденных молекул в верхней ионосфере. Л., 1973. [6] Полярная верхняя атмосфера/Под ред. Ч. Дира и Я. Холтета. М., 1983. [7] Hays G., Oskam H.//J. Chem. Phys. 1973. **59**. P. 1507. [8] Данилов А. Д. и др. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л., 1987.

Поступила в редакцию
26.05.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 2

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.638.5

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ В ШИРОКИХ ИНТЕРВАЛАХ ТЕМПЕРАТУР

А. М. Тишин

(кафедра общей физики для естественных факультетов)

Рассматриваются вопросы выбора рабочих тел для магнитных холодильных машин, работающих в широких температурных интервалах. Предложенные критерии позволили определить редкоземельные металлы и сплавы, перспективные для использования в магнитных холодильных машинах, работающих в интервалах температур 20—77 К и 77—300 К.

Перспективность применения магнитных холодильных машин (МХМ) определяется их высокой эффективностью (на 20—30% большей, чем у существующих конструкций) и значительным сроком службы. Создание МХМ, работающих в широких температурных диапазонах, сдерживается отсутствием подходящих рабочих тел. В настоящей работе обсуждаются критерии выбора рабочих тел, на основе которых определены тяжелые редкоземельные металлы (РЗМ) и их сплавы, эффективные для использования в МХМ, работающих от 20 до 77 К и от 77 до 300 К.