

В.М. Климкин, В.Е. Прокопьев, Л.Н. Попов

ИНЕРТНЫЕ ГАЗЫ КАК ОПТИЧЕСКИЕ ТРАССЕРЫ ГАЗОВЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Рассмотрены оптические эффекты, возникающие в полярной ионосфере при инжекции в нее атомов благородных газов. Анализ проведен на примере инжекции атомов ксенона. Оценки показывают, что при впрыскивании Хе на высотах $90 \div 800$ км наземные станции могут зарегистрировать импульс излучения ХеО и тушение линий ОI. Такого рода трассеры позволят глубже понять физические процессы в полярной ионосфере.

Активные эксперименты в околоземном космическом пространстве позволяют получить качественно новую информацию о физических процессах, происходящих в ионосфере Земли, в частности, глубже понять природу полярных сияний [1]. Одним из важных вопросов физики полярных сияний является изучение глубины погружения электронных потоков в атмосферу Земли и положения нижней границы полярных сияний.

Последние данные, полученные с помощью наземных пространственно разнесенных фотометров, показали, что нижняя граница полярных сияний может опускаться до высот $60 \div 70$ км, что существенно отличается от ранее принятых значений в $100 \div 110$ км. Весьма важным является определение высотного профиля концентрации возбужденных атомов во всей толще слоя, в том числе на нижней границе, где уже проявляются эффекты тушения. Представляется интересным прогнозировать возможность создания искусственного газообразного оптического трассера для исследования полярной ионосферы, в частности, для получения пространственного распределения возбужденных атомов.

В настоящей статье рассматриваются оптические эффекты, возникающие в полярной ионосфере при инжекции в нее атомов благородных газов, и возможность использования их в качестве трассеров. Благородные газы хорошо исследованы с точки зрения их взаимодействия с электронными потоками, так же как и их поведение в атом-атомных реакциях. Будучи естественным компонентом атмосферы, благородные газы безвредны в плане экологических последствий экспериментов, проводимых в окружающей среде.

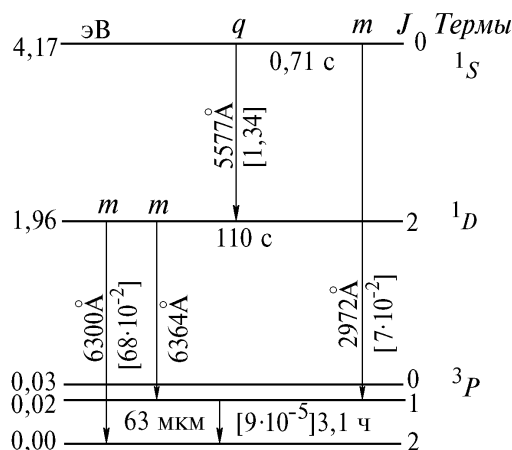


Рис. 1. Основная конфигурация $1S^2 2S^2 2P^4$ атомарного кислорода ОI, иллюстрирующая термы и расщепление уровня

Как известно, весомый вклад в интенсивность и спектр полярных сияний вносит излучение атомарного кислорода на длинах волн λ , равных 5577 (переход $1S_0 - 1D_2$), 6300 ($1D_2 - 3P_2$) и 6364 \AA ($1D_2 - 3P_1$). Напомним, что состояния $1S_0$ и $1D_2$ являются метастабильными: радиацион-

ное время жизни первого составляет примерно 0,7 с, второго D_2 превышает 100 с. Высокая яркость запрещенных линий ОI в полярных сияниях обусловлена значительной физической толщиной излучающего слоя – до 200 км и диссоциативным механизмом возбуждения указанных состояний атома кислорода, значительно ослабляющего абсорбцию и тушение излучения на нижней границе излучающего слоя. Рис. 1 иллюстрирует термы и переходы в спектре ОI.

В последнее время установлено, что излучательные свойства атомов кислорода существенно изменяются в их смесях с инертными газами, в частности, с Хе [2–4], за счет образования эксимерных молекул типа ХеО. Например, установлено, что вероятность оптических переходов в молекуле ХеО, соответствующих атомной линии $\lambda=5\,577\text{ \AA}$, в $10^5 \div 10^6$ раз превышает вероятность таковых в изолированном атоме кислорода на той же длине волны [5 ÷ 8]. Механизм излучения иллюстрируется на рис. 2.

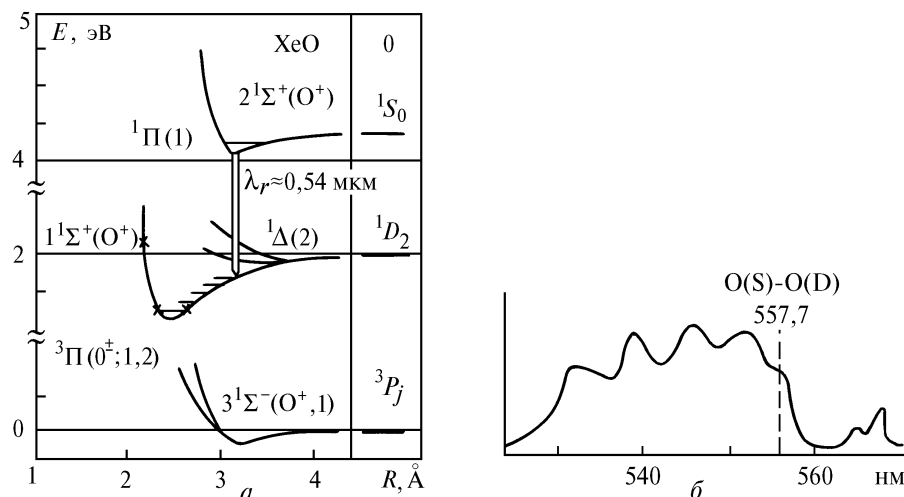


Рис. 2. Потенциальные кривые нижних электронных состояний молекулы ХеО (а) и спектр люминесценции ХеО (б)

Излучение смеси Хе + О характеризуется значительным сдвигом длины волны ХеО относительно собственного перехода $1^1S_0 - 1^1D_2$ атома ОI и эффектом тушения излучения на атомарных переходах $1^1D_2 - 3^1P_j$. Последний возникает вследствие пересечения потенциальной кривой состояния $1^1\Sigma^+$ с отталкивательной кривой основного состояния ХеО.

Таким образом, если в некоторой области полярного сияния в возбужденных состояниях 1^1S_0 была запасена энергия, пропорциональная плотности этих состояний, добавление Хе приводит к ее высвобождению в виде импульса излучения полосы ХеО с $\lambda = 530 \div 560$ нм. Энергия, запасенная в том же объеме в состояниях 1^1D_2 , высвобождается в виде кинетической энергии атомных частиц, что приводит к импульсному ослаблению излучения ОI на линиях $\lambda = 6300$ и 6364 \AA . Эти сигналы можно использовать для построения пространственных профилей возбужденных состояний ОI.

Рассмотрим условия, при которых данный эффект может наблюдаться в ионосфере полярных широт. Пороговую концентрацию Хе оценим из условия равенства вероятностей спонтанного $A_{\text{сп}}$ излучения и излучения, индуцированного столкновениями:

$$A_{\text{сп}} = \kappa_1 [\text{Хе}]_{\text{пор}},$$

где κ_1 – константа скорости столкновений, индуцирующих излучение; $[\text{Хе}]$ – пороговая плотность атомов Хе. Величина $\kappa_1 = 2,7 \cdot 10^{-15}\text{ см}^{-3}$ [8], следовательно, $[\text{Хе}]_{\text{пор}} \cong 3 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$. Так как $A_{\text{сп}}$ для $\lambda = 6300\text{ \AA}$ на два порядка меньше $A_{\text{сп}}$ для $\lambda = 5577\text{ \AA}$, то пороговая концентрация Хе для тушения красных линий будет $\sim 10^{12}\text{ см}^{-3}$. Для сравнения в таблице приведены обобщенные данные по плотности атомов кислорода в излучающем слое на высотах $80 \div 800$ км [10].

Как видно из таблицы, для наблюдения описанных выше эффектов плотность атомов Хе должна на 1÷3 порядка превышать плотность кислорода.

| | | | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| H , км | 86 | 90 | 100 | 150 | 200 |
| $[O]$, см^{-3} | $8,6 \cdot 10^{10}$ | $2,4 \cdot 10^{11}$ | $4,3 \cdot 10^{11}$ | $1,8 \cdot 10^{10}$ | $4,1 \cdot 10^9$ |
| H , км | 250 | 300 | 400 | 500 | 750 |
| $[O]$, см^{-3} | $1,4 \cdot 10^9$ | $5,4 \cdot 10^8$ | $9,6 \cdot 10^7$ | $1,8 \cdot 10^7$ | $3,7 \cdot 10^5$ |

Сделаем оценки интенсивности импульса свечения ХеО в типичных физических условиях верхней атмосферы высокоширотной зоны. Предположим, что контейнер с Хе находится на геофизической ракете, движущейся со скоростью 10^5 см/с. При распылении Хе в направлении, противоположном движению ракеты, расширение области Хе в начальной стадии определяется преимущественно газодинамическими процессами в клапанах, трубопроводах и соплах системы инъекции, затем диффузией [9]. Для рационального использования Хе режим его впрыскивания должен быть точечным. При исследовании вертикального профиля распределения физических параметров целесообразен пространственный масштаб, равный примерно 1 км, для горизонтальных профилей он может быть существенно большим. Если на борту ракеты содержится 10^{26} атомов Хе (40 л при 250 атм), то, исходя из необходимости трассировать слой ~ 100 км, в каждой точке атмосферы можно впрыснуть до 10^{24} атомов Хе. Область взаимодействия в соответствии с пороговыми условиями займет объем 10^{10} см^3 , при этом импульс излучения длительностью $\sim 0,1$ с должен составить $J = 10^{21}$ фотонов, что соответствует приходу 10^7 фотонов на 1 см^2 поверхности Земли. Этот импульс излучения может быть легко зарегистрирован фотоэлектрическими фотометрами со спектральной селекцией сигнала, регистрирующими участок спектра с $\lambda = (540 \pm 10)$ нм. В этом спектральном интервале нет ярких линий естественных компонентов ионосферы, поэтому проблем выделения свечения всего слоя не существует.

Указанные выше оценки сделаны с учетом того факта, что в условиях верхней атмосферы радиационный распад ХеО является наиболее быстрым из процессов, определяющих релаксацию данной эксимерной молекулы.

Несколько сложнее ситуация с наблюдением сигналов, обусловленных тушением состояния 1D_2 , так как спектральной селекцией выделить этот сигнал, по-видимому, невозможно. При наблюдениях непосредственно на линиях ОI сигнал тушения будет маскироваться естественными временными вариациями интенсивности слоя. Возможно, что сигнал тушения может быть зарегистрирован при использовании двухканального спектрометра, регистрирующего излучение из двух соседних участков, подверженных и неподверженных воздействию Хе. Для реализации таких наблюдений требуются высокое угловое разрешение фотометра и его точная пространственная ориентировка ($0,5'$).

В заключение отметим, что кратковременные вспышки интенсивности на $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, сопровождающиеся частотным сдвигом линии излучения в коротковолновую область, неоднократно наблюдались ранее (см., например, работу [11]), но не нашли физического объяснения. В связи с тем что район наблюдения таких вспышек (обсерватория Тикси) является сейсмоактивным, можно предположить, что данные вспышки являются следствием впрыскивания в атмосферу инертных газов литосферного происхождения [12, 13].

Основой для сделанного предположения является практически 100%-я пространственная корреляция областей, в которых наблюдались указанные явления, и сейсмоактивных зон, в которых наблюдались землетрясения силой до 8 баллов. Возможным механизмом поступления литосферных газов в верхние слои атмосферы являются волновые явления, происходящие в ней и сопровождающие проявления сейсмической активности.

1. Митяков Н. А. // Активные воздействия на ионосферу. Физика ионосферы. Тезисы лекций VI Международной школы по физике ионосферы. М., 1983. С. 44.
2. Hampson R. F., Okabe H. // J. Chem. Phys. 1970. V. 52. P. 1930.
3. Зуев В. С., Михеев Л. Д., Погорельский И. В. // Труды ФИАН им. П.Н. Лебедева. 1980. т. 125. С. 104.
4. Басов Н. Г. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. N 4. С. 930.
5. Cunningham D. L., Clark K. C. // J. Chem. Phys. 1974. V. 61. P. 1118.
6. Donovan P. J., Husain D. // Chem. Rev. 1970. V. 70. P. 489.

7. Чемберлен Дж. // Теория планетных атмосфер. М.: Мир, 1981. 352 с.
8. Экимерные лазеры // Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981. 482 с.
9. Van Hemelrijck E., Van Ransbeek E. // Aeron Acta. 1981. V. A. N 231. P. 30.
10. Llewellyn E.J., Solhum B.H. // Explor. Polar Upper Atmos. Proc. NATO Adv. Study Inst., Lillehammer, 1980. Dordrecht e.a., 1981. P. 165.
11. Надубович Ю.Ф. Физика верхней атмосферы высоких широт. Вып. 3. ЯФ СО РАН. Якутск: 1975. С. 134–150.
12. Надубович Ю.Ф. Береговой эффект в полярных сияниях. М.: Наука, 1967. 79 с.
13. Кочетков В.М. Сейсмичность Якутии. М.: Наука, 1966. 92 с.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
19 марта 1994 г.

V.M. Klimkin, V.E. Prokopyev, L.N. Popov. **Inert Gases as Tracers of Gas and Electron Fluxes in the Polar Ionosphere.**

In this paper we discuss some optical effects that can occur in the polar ionosphere due injection of inert gases in it. We analyze in this study the case when xenon atoms are injected into the ionosphere. Our estimations show that injection of Xe atoms at altitudes from 90 to 800 km can cause a pulse of emission from XeO molecule and quenching of OI spectral lines detectable from ground surface. Therefore such injections can be useful for studying the processes in polar ionosphere.