

Г.С. Евтушенко, М.Ю. Катаев, В.М. Клишкин

**МЕТОД ЛОКАЦИИ СЛОЕВ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ
В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ И КОСМОСЕ**

Рассматривается возможность обнаружения метастабильных атомов меди при помощи излучения Cu-лазера с длинами волн 510,6 и 578,2 нм. Флуоресцентный канал переизлучения 324,7 и 327,4 нм позволяет получить искомую информацию о концентрации метастабильных атомов меди. Проведенные расчеты показывают, что для слоя метастабильных атомов меди толщиной 10 км и плотностью 1 атом/см³, лежащего на высоте 90 км, возможно их обнаружение при помощи лазера со средними параметрами как с поверхности Земли так, и с космического аппарата, находящегося на высоте 300 км.

Введение

Одним из характерных газовых компонентов верхней атмосферы и ближнего космоса являются атомы химических элементов в основных, метастабильных и ионизированных состояниях. Они играют основополагающую роль в физико-химических реакциях и излучательных свойствах верхней атмосферы [1].

Однако вопрос о механизме поступления ряда атомов, в том числе металлов, в верхнюю атмосферу является дискуссионным. В частности, в качестве источника атомов металлов рассматриваются и космос и Земля. В первом случае речь идет о метеорах, подавляющая часть которых, влетая в атмосферу, разрушается на высотах 60–100 км. Спектральный анализ метеорного вещества указывает на присутствие атомов и ионов таких элементов, как: H, O₂, Na, Mg, As, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni. В отдельных метеоритах присутствуют Al, S, Au [7–9]. Во втором случае полагают, что присутствие атомов и ионов в верхней атмосфере обусловлено не только метеорным материалом, но и вертикальным переносом их с поверхности Земли. Качественным подтверждением земного происхождения слоев металлов является сходство элементного состава аэрозолей и воздуха над поверхностью Земли и в верхних слоях атмосферы, корреляция между содержанием натрия в верхней атмосфере и над поверхностью океана (некоторые из данных, взятых из [1] и иллюстрирующих это предположение, приведены в табл. 1–3). Как видно из этих таблиц, перечень металлов, присутствующих в верхней атмосфере, должен быть весьма широк.

Следует отметить, что наличие нормальных, либо возбужденных состояний атомов и ионов малых примесей, а также их плотность, высотный профиль и другие параметры практически не исследованы (за исключением натрия и калия [2, 3]).

Т а б л и ц а 1

Состав аэрозолей в приводном слое балтийского моря и Атлантики (нг/м³)

Элемент	Na	Zn	Cu	Mn	Fe	Cr	Li
Балтика	200–700	20–30	10–20	4–8	10	1–2	1–4
Атлантика	170–800	90–130	5–13	4–26	5–100	5–16	–

Т а б л и ц а 2

Химический состав воздуха в различных регионах (нг/м³)

Элемент	As	Cd	Hg	Pb	Zn	Fe
Континент	0,02–0,15	0,02–30	0,02	0,2–400	2–70	9–5100
Моря	0,01–0,8	0,003–0,5	0,02–5	0,05–64	0,04–56	3–1000
Атлантика	0,0007–0,04	0,018	–	0,2–1,2	0,02–0,06	0,5–1,2

Антропогенные выбросы в отдельных странах Европы (т/год)

Элемент	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Fe
Всего	3560	1155	9390	89100	57400	5100

В данной статье рассмотрена одна из простых схем детектирования метастабильных атомов в верхней атмосфере с Земли и космических аппаратов и установлено, что оптические локаторы на базе лазеров на парах металлов позволяют обнаруживать и исследовать слои метастабильных атомов ряда элементов даже при крайне малых их плотностях – $1 \div 10$ атом/см³.

Идея метода

При рассмотрении различных вариантов наблюдения метастабильных атомов «редких» в верхней атмосфере элементов целесообразно воспользоваться «счастливой случайностью» – наличием лазеров на парах этих элементов, работающих на переходах с резонансных на метастабильные состояния. Условия возбуждения лазеров близки к условиям верхней атмосферы, что обеспечивает автоматическое совпадение контуров излучения и поглощения частиц и гарантирует высокую эффективность взаимодействия.

Идея построения локатора с лазерами на парах химических элементов основана на возможности возбуждать в слоях метастабильных атомов и ионов антистоксову флуоресценцию с высокой эффективностью. Энергия возбуждения, запасенная метастабильными атомными и ионными частицами, весьма значительна – $E_b = 1 \div 2$ эВ. Это приводит к антистоксовому сдвигу флуоресценции на 10^4 см⁻¹. Например, энергия двух метастабильных состояний иона кальция равна 13711 и 13650 см⁻¹.

При облучении слоя кальция, содержащего ионы в метастабильных состояниях, ИК-излучением с длинами волн 854 и 855 нм возникает антистоксова фиолетовая флуоресценция на длинах волн 397 и 393 нм. Этот пример является типичным – зондирование в ИК-диапазоне возбуждает флуоресценцию в УФ-области спектра. При этом спектрально разделить сигналы рассеяния для зондирующего излучения и сигналы флуоресценции от исследуемых слоев не составит большого труда.

На высотах около 100 км плотность атмосферы составляет 10 см⁻³ и температура 200 К [1]. При таких условиях время межмолекулярных столкновений составляет 10^{-3} с. Так как радиационное время жизни резонансных состояний атомов равно примерно 10^{-8} с, то процессами тушения можно пренебречь и квантовый выход флуоресценции считать равным 1.

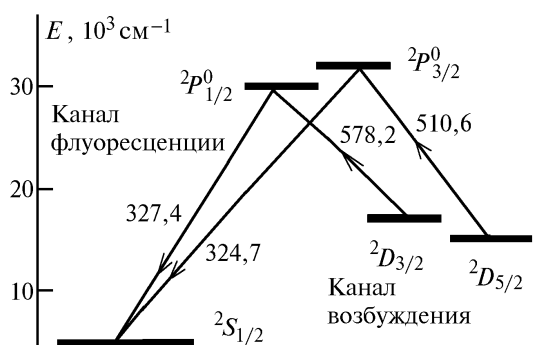


Рис. 1. Схема возбуждения антистоксовой флуоресценции в слое атомов меди, содержащем метастабильные частицы

Для примера положим, что имеется слой метастабильных атомов меди. Как видно из табл. 1–3, медь является элементом средней распространенности как в метеорных, так и в земных источниках. Для атомов меди как возбуждающее (на длинах волн 510,6 и 578,2 нм), так и флуоресцентное излучения (324,7 и 327,4 нм) слабо поглощаются атмосферными газами. Для зондирования слоев меди наиболее мощный и доступный из всех лазеров на парах металлов [4] – это лазер на парах меди. На рис. 1 представлена диаграмма нижних уровней атома меди. Если изначально некоторая часть атомов меди находится в метастабильных состояниях

${}^2D_{3/2, 5/2}$, то воздействие излучением Си-лазера (канал возбуждения) приведет к переходу метастабильных атомов в резонансные состояния ${}^2P_{1/2, 3/2}^0$ и далее они посредством излучения перейдут в основное ${}^2S_{1/2}$ состояние (флуоресцентный канал).

Сделаем оценки локационных сигналов для гипотетического слоя метастабильных атомов меди. Для примера напомним, что слой атомов натрия толщиной около $l = 10$ км располагается на высоте 92 км и имеет плотность $N_{\text{Na}} = 10^2 \div 10^3$ атом/см³ [1–3]. Слой атомов меди должен располагаться несколько ниже слоя натрия и иметь меньшую плотность, что видно из табл. 1–3. Положим, по аналогии со слоем Na, что слой атомов меди имеет толщину $l = 10$ км, лежит на высоте $H = 90$ км и плотность атомов в метастабильных состояниях $N_{\text{Cu}} = 1 \div 10$ атом/см³. Оптическая плотность такого слоя для возбуждающего излучения (510,6 и 578,2 нм) составит $\gamma = 10^{-7}$, а на длинах волн флуоресценции 324,7 и 327,4 нм $\gamma_f = \sigma_f N_{\text{Cu}} l = 10^{-6}$ в силу большей величины сечения σ_f . Сечения поглощения для зондирующего и флуоресцентного излучений были вычислены для Си по данным о вероятностях переходов [10] и равны $\sim 10^{-13}$ и 10^{-12} см² соответственно в предположении доплеровских контуров линий. Сечения взяты по порядку величины в связи с тем, что реальные контуры отличаются от доплеровских вследствие изотопического расщепления [11]. Плотности метастабильных атомов и атомов в основном состоянии приняты равными.

Как видно из приведенных оценок, слои атомов оказываются оптически прозрачными, поэтому задача дистанционного обнаружения и исследования таких слоев является чисто локационной.

Методика расчета эхосигналов и полученные результаты

Для расчета ослабления лазерного излучения в атмосфере необходимо использовать лидарное уравнение для флуоресценции [2, 3]. Сигналы рассчитывались для двух случаев расположения лидара: на уровне Земли и на космическом аппарате. В первом случае трасса зондирования проходит через всю толщу атмосферы от 0 до 100 км, а во втором – только через атмосферный слой 100–80 км. В расчет заложены следующие параметры лидарной системы:

диаметр приемного телескопа, м	1
средняя мощность излучения лазера на парах меди, Вт	10
длины волн излучения, нм	510,6 и 578,2
частота повторения импульсов генерации, кГц	10
длительность импульса излучения, нс	30

Расчет ослабления в газовой-аэрозольной атмосфере проведен для модели лета средних широт [5]. На длинах волн 510,6 и 578,2 нм учтено поглощение излучения молекулами O₃ и NO₂, а на длинах волн флуоресценции (приема информации) 324,7 и 327,4 нм – молекулами O₃, NO₂ и SO₂. Коэффициенты поглощения указанных газов взяты из [6]. Расчет эхосигналов от полной толщины слоя может быть выполнен исходя из следующего соотношения для флуоресцентного канала [2, 3]:

$$E = E_0 K S \exp(-\gamma_1) \exp(-\gamma_2) \exp(-\gamma_3) \sigma_f N_{\text{Cu}} / (4\pi H^2),$$

где E_0 – число фотонов в лазерном импульсе; $\gamma_1 = \int \alpha_1(x) dx$ – оптическая толщина слоя для возбуждающего излучения; $\gamma_2 = \int \alpha_2(x) dx$ – оптическая толщина атмосферы для флуоресцентного канала; $\gamma_3 = \sigma N l$ – оптическая толщина всего слоя паров Си для возбуждающего излучения; $\alpha_1 = \alpha_{a1} + \alpha_{m1} + \alpha_{g1}$ – ослабление атмосферы на длине волны возбуждающего излучения за счет (a) аэрозоля, (m) молекулярного рассеяния и (g) поглощения газами; $\alpha_2 = \alpha_{a2} + \alpha_{m2} + \alpha_{g2}$ – ослабление атмосферы на длине волны флуоресцентного канала; S – площадь приемного зеркала; K – аппаратная константа; H – высота слоя зондирования. Заметим, что если квантовый выход флуоресценции равен единице, то сечение флуоресценции σ_f совпадает с сечением поглощения.

На рис. 2 представлены зависимости оптической толщины аэрозольных и газовых компонентов атмосферы от высоты для каналов возбуждения и флуоресценции. Как видно из рис. 2, оптическая толщина для возбуждающего излучения $\gamma = 0,2$ (кривая 2), а для флуоресцентного канала $\gamma = 1$ (кривая 4). Для $H = 90$ км искомый сигнал составит $E = 2,5 \cdot 10^{-21} E_0$ фотонов за один импульс. При частоте следования импульсов генерации лазера на парах меди 10 кГц

$E_0 = 10^{16}$ фотонов, скорость прихода сигнальных фотонов составит $v \approx 1 \text{ с}^{-1}$, что принято считать хорошим сигналом по отношению к другим задачам зондирования высотных слоев атмосферы.

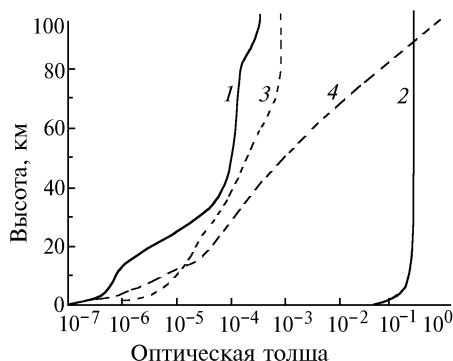


Рис. 2. Оптические толщины молекулярной атмосферы на длинах волн, соответствующих длинам волн возбуждения и флуоресценции для случая локации с поверхности Земли. 1, 2 — оптическая толщина аэрозольного (1) и молекулярного (2) ослабления на длине волны возбуждения; 3, 4 — оптическая толщина аэрозольного (3) и молекулярного (4) ослабления для канала флуоресценции (штриховые кривые)

Наряду с метастабильными атомами меди рассмотренным методом могут быть зарегистрированы и другие элементы (см. табл. 4). При этом часть из них может зондироваться как с Земли, если поглощение атмосферными газами мало, так и с борта космического аппарата. В том случае, когда атмосфера не прозрачна для возбуждающего и (или) флуоресцентного каналов, измерения целесообразно выполнять с борта космического аппарата.

Таблица 4

Некоторые из химических элементов, метастабильные состояния атомов и ионов которых могут быть зарегистрированы флуоресцентным методом

№	Элемент	Длина волны возбуждения, мкм	Длина волны флуоресценции, мкм	Земля	Космический аппарат
Атомы					
1	Mn	0,515	0,222	—	+
2	Cu	0,511; 0,578	0,397; 0,393	+	+
3	Sr	6,456	0,408	—	+
4	Ba	1,500	0,553	—	+
5	Au	0,628	0,267	—	+
6	Pb	0,723	0,283	—	+
7	Bi	0,472	0,307	+	+
8	Tm	0,590	0,389	+	+
9	Ca	5,546	0,422	—	+
10	Eu	1,760	0,450	—	+
Ионы					
1	Ca	0,854; 0,855	0,397	+	+
2	Sr	1,033; 1,092	0,408	—	+
3	Ba	0,614	0,455	+	+
4	Eu	1,002	0,372	—	+

Таким образом, метод локации слоев метастабильных атомов и ионов в верхней атмосфере и ближнем космосе с использованием наземных и бортовых локаторов с излучателями — лазерами на парах химических элементов — может стать хорошим инструментом для регистрации и исследования этих слоев, если таковые имеются. Авторы благодарят В.С. Шаманаева за полезные замечания и дискуссии по материалам статьи.

1. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
2. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
3. Межерис Р. // Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. // Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
5. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. 294 с.

6. Применение лазеров для определения состава атмосферы / Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 216 с.
7. Гетман В. С. Метеоры и метеориты. М.: Знание, 1984. 62 с.
8. Томига К. Беседы о кометах. М.: Знание, 1982. 52 с.
9. Дивари Н. Б. Зодиакальный свет и межпланетная пыль. М.: Знание, 1981. 64 с.
10. Карлисс Ч., Бозман У. Вероятность переходов и силы осцилляторов 70 элементов. М.: Мир, 1968. 311 с.
11. Воробьева Л. П., Евтушенко Г. С., Климкин В. М. и др. // Оптика атмосферы и океана. Т. 8. N. 11. 1995. С. 1648–1651.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
25 апреля 1996 г.

G. S. Evtushenko, M. Yu. Kataev, V. M. Klimkin. Detection of Metastable Atoms Layers in the Upper Atmosphere and the Space.

The possibility to detect the copper metastable atoms by means of Cu-laser radiation at 510,6 and 578,2 nm wavelengths is treated in the paper. The fluorescent channel of reradiation at 324,7 and 327,4 nm allows the obtaining of the desired information on the copper metastable atoms concentration. The conducted calculations have shown that it is possible to detect the copper metastable atoms layer of 10 km thickness and 1 atom per cm^3 density at a height of 90 by means of a standard Cu-laser situated on the ground surface or aboard spacecraft at a height of 300 km.