

М.Ф. Лагутин, А.А. Зарудный, А.Л. Верхоробин, В.П. Торжков

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ НАТРИЕВОГО СЛОЯ**

Регулярные наблюдения натриевого слоя в Туапсе были проведены для исследования динамики его параметров. Передающая аппаратура резонансного лидара включает перестраиваемый лазер с ламповой накачкой (589 нм; 8 пм; 0,5 Дж). Пространственное разрешение системы составляет 1 км.

Всего в течение года было 32 ночи измерений, примерно по 5–6 сеансов (30–50 мин) за ночь. Средняя высота слоя составляла 94 км при среднеквадратической ширине 3,7–6,0 км.

Значительное повышение содержания натрия отмечено в августе и объясняется притоком вещества крупных частиц метеорного потока.

Изучение слоев малых примесей мезосферы (натрия, лития, калия, кальция, железа) лидарными методами [1] необходимо для построения динамической модели естественного фона, на котором проявляются аномалии поведения различных примесей антропогенного происхождения.

Объяснить морфологию слоя только на основе метеорного притока, без учета термодинамики и фотохимии стока натрия, не представляется возможным. Лишь сезонно-широтные вариации концентрации натрия в вертикальном столбе и средней высоты максимума слоя удовлетворительно коррелировали со средней высотой абляции метеоров массой 10^5 – 10^7 г, ответственных за основной приток вещества космического происхождения [2]. Аномалии притока примесей, отмеченные в периоды действия мощных извержений вулканов, а также узкие слои, шириной 0,5–1 км, эпизодически наблюдаемые в полярных регионах, не определяют глобальное поведение параметров слоя.

Теоретические предположения неоднократно проверялись на основе многолетних рядов лидарных наблюдений натриевого слоя на станциях, расположенных вблизи океанов: в Англии [3], Франции [4], Японии [5], Бразилии [6], США [7]. Исследования натрия в Арктике [8] и Антарктиде [9,10] указывают на своеобразии его поведения, обусловленного аномалиями авроральных зон.

Для систематического исследования динамики натриевого слоя в континентальных условиях Харьковским институтом радиоэлектроники создана сеть однотипных лидарных станций, расположенных в Евро-Азиатском регионе: в Ашхабаде, Туапсе и Харькове [11-13]. В настоящей статье описаны аппаратура и результаты регулярных наблюдений, полученные в Туапсе (44°с.ш., 39°в.д.)

Туапсинская станция резонансного зондирования примесей мезосферы оснащена перестраиваемым лазером на органическом красителе Родамин-6G с ламповой накачкой, обеспечивающим зондирование на резонансной длине волны натрия (основные параметры аппаратуры приведены ниже).

Передатчик	Приемник		
Длина волны, нм.....	589	Площадь апертуры, м ²	0,4
Расходимость, мрад.....	0,6	Угол зрения, мрад.....	1,5
Ширина линии, пм.....	8	Полоса пропускания, нм.....	2
Энергия импульса, Дж.....	0,5	Количество каналов.....	100
Длительность импульса, мкс.....	8	Длительность канала, мкс.....	6,7
Частота повторения, Гц.....	0,2	Квантовая эффективность, %.....	3,5
Коэффициент пропускания оптики.....	0,6	Коэффициент пропускания оптики.....	0,3

Перестройку длины волны генерации и сужение полосы излучения осуществляют двумя внутрирезонаторными эталонами. Грубую настройку на резонансную линию проводят с помощью спектроскопа на базе дифракционной решетки, а точную – по амплитуде импульса

тока лампы с полым катодом. Такое метрологическое обеспечение позволяет оценивать поперечное сечение резонансного рассеяния атомов натрия с точностью 10% [12].

Настройка на резонансную длину волны контролируется в течение всего сеанса измерений. Пассивную стабилизацию параметров лазерного передатчика обеспечивает термостабилизация интерферометров с точностью $0,2^{\circ}\text{C}$ и раствора красителя -1°C . При этом настройка сохраняется длительное время без вмешательства оператора.

Приемный телескоп собран по схеме Ньютона на базе сферического зеркала диаметром 0,7 м. Угол зрения задан диафрагмой в фокальной плоскости зеркала и составляет 1,5 мрад. Оси приемного и передающего телескопов совмещают с точностью 0,5 мрад с помощью призменной каретки с двумя взаимно перпендикулярными уровнями, перемещаемыми с оптической оси передающего на приемный телескоп лидара. Сфокусированное излучение регистрируемого сигнала поступает из приемного телескопа на фотокатод малошумящего ФЭУ–136.

При лазерной локации верхней атмосферы интенсивность рассеянного излучения имеет большой динамический диапазон. Для снижения уровня шумов последствия ФЭУ используется механический затвор объектива (обтюратор), обеспечивающий раскрыв диафрагмы приемного телескопа с 20–25 км за 50 мкс, что соответствует 7,5 км по высоте. Таким образом, полный раскрыв объектива наступает в диапазоне 28–33 км в зависимости от выбора начальной задержки раскрыва.

Рассеянное световое излучение регистрируют методом счета фотонов с амплитудной дискриминацией. Для этого сигналы с выхода ФЭУ подают на усилитель-формирователь, режим которого установлен в области плато счетной характеристики ФЭУ (для максимального подавления диодных шумов). С выхода усилителя-формирователя импульсы поступают на выходы двух быстродействующих стробируемых счетчиков, включаемых поочередно на 6,67 мкс для последовательного накопления сигналов, приходящих с километровых высотных интервалов.

Приемное устройство лидара позволяет регистрировать сигнал по 100 высотным интервалам с дискретным переключением задержки начала регистрации относительно момента излучения зондирующего импульса (0, 10, 20, ... , 70 км). Для учета уровня фона ночного неба и уровня собственных шумов ФЭУ приемное устройство регистрирует еще 5 дополнительных каналов по 66,7 мкс каждый (10 км по высоте), следующих непосредственно за 100-километровыми интервалами.

Поперечное сечение резонансного рассеяния атомов натрия (при ширине спектральной линии 8 пм) составляет $8 \cdot 10^{15} \text{ м}^2$, что примерно в 12 раз меньше его максимального значения. При однопроходном коэффициенте пропускания атмосферы, равном 0,5, и концентрации атомов $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ в максимуме слоя аппаратура позволяет регистрировать порядка 3,5 фотоэлектронов в километровом интервале высотного усреднения. В этом случае за десятиминутный сеанс измерений накопление составит примерно $4 \cdot 10^3$ фотоэлектронов от всего слоя.

При изменении прозрачности атмосферы в широких пределах, что характерно для черноморской прибрежной зоны, и значительных сезонных вариациях концентрации натрия средняя величина реально регистрируемого сигнала изменяется в диапазоне от 1 до 8–10 фотоэлектронов в максимуме слоя, что соответствует накоплению 10^3 – 10^4 фотосчетов от слоя за десятиминутный сеанс.

Измерения резонансного рассеяния атмосферного натрия регулярно проводятся в Туапсе с целью исследования динамики слоя и волновых возмущений атмосферы в диапазоне 80–100 км [13]. Результаты, представленные в данной статье, охватывают период с апреля 1989 по март 1990 г. и включают 32 ночи измерений, в течение которых проводилось в среднем по 5–6 сеансов измерений, длительностью по 30–50 мин. каждый.

В результате анализа отмечены частые волнообразные возмущения профилей, обусловленные распространением внутренних гравитационных волн в мезосфере. При этом форма профилей была искажена и иногда содержала 2–3 максимума. Сравнительно редко профили имели гладкую почти правильную форму, напоминающую гауссовское распределение. Повышенная возмущенность слоя была отмечена в утренние (перед рассветом), а максимальная – в вечерние (после заката) часы.

Накопление составляло $(1-3) \cdot 10^4$ фотоэлектронов от слоя за сеанс в зависимости от прозрачности атмосферы и общего содержания натрия в вертикальном столбе. Уровень фона ночного неба и собственные шумы ФЭУ измерялись в промежутках между зондами и вычитались перед обработкой. Отношение полезного сигнала к уровню фона и собственных шумов ФЭУ обычно составляло от 100 до 200 в максимуме слоя.

Параметры слоя, количественно характеризующие его свойства, определялись через пространственные моменты M_i профиля

$$M_i = \int_{z_l}^{z_u} z^i c_0(z) dz, \quad (1)$$

где $c_0(z)$ – вертикальный профиль концентрации натриевого слоя; z_H, z_B – нижняя и верхняя границы натриевого слоя.

Концентрация примеси в вертикальном столбе совпадает в этом случае с нулевым пространственным моментом профиля слоя $c_s = M_0$, а высота и среднеквадратическая ширина слоя равны соответственно

$$z_s = \frac{M_1}{M_0}, \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{M_2}{M_0} - \left[\frac{M_1}{M_0} \right]^2, \quad (3)$$

Точность измерений концентрации натрия в вертикальном столбе, обусловленная стохастической природой лидарных сигналов, не превышала 1%. Однако осуществлявшаяся по сигналам молекулярного рассеяния калибровка абсолютных значений профиля, зарегистрированных в диапазоне 35–40 км, вносила дополнительную погрешность. Поэтому реальная точность измерений абсолютных значений концентрации составляла 15–20% из-за вариации модельных значений концентрации частиц воздуха и нестабильности ширины полосы излучения.

Среднеквадратические погрешности оценок высоты и ширины слоя не превышали 0,2 км.

На рис. 1 представлен сезонный ход концентрации натрия в вертикальном столбе в районе Туапсе. Точками отмечены усредненные за ночь значения концентрации. Вертикальные линии на графике показывают диапазон вариаций концентрации в течение ночи.

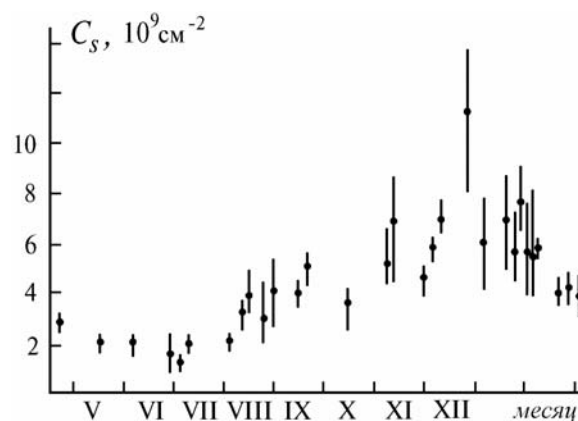


Рис. 1. Сезонный ход натрия в вертикальном столбе

Максимальная средненочная концентрация натрия в столбе наблюдалась 2–3 июля 1989 г. и составляла $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, а максимальная 27–28 декабря ($1,1 \cdot 10^{+10} \text{ см}^{-2}$). В целом характер

сезонной зависимости концентрации в столбе не отличается от наблюдавшейся над Урбаной (США, шт. Иллинойс) в 1984-1986 гг. [7], хотя абсолютные значения концентрации в Туапсе несколько ниже. Заметные повышения общего содержания натрия, отмеченные 13-14 и 15-16 августа 1989 г. в Туапсе, возможно, связаны с вариацией притока веществ от крупных частиц метеорных потоков эпохи Персеид, которые наблюдались визуально для ярких метеоров.

Сезонные распределения высоты и среднеквадратической ширины слоя показаны на рис. 2. Вертикальные линии на графиках ограничивают диапазоны изменений этих параметров за ночь.

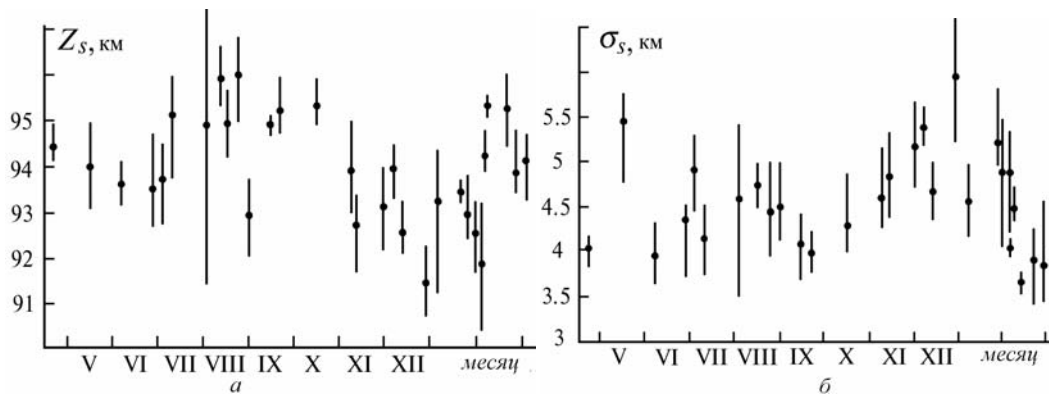


Рис. 2. Сезонный ход высоты (а) и среднеквадратической ширины (б) слоя

Средняя за весь период наблюдений высота слоя равнялась 94 км и изменялась от 91,4 до 96,0 км. Максимальные отклонения высоты в течение ночи обычно составляли $\pm (0,5-1,5)$ км. Среднеквадратическая ширина натриевого слоя в Туапсе изменялась от 3,7 до 6,0 км, а ночные вариации ширины, как правило, не превышали $\pm (0,5-0,7)$ км.

Существенное увеличение высоты натриевого слоя до 95-96 км наблюдалось в июле-октябре 1989 года. Ширина слоя в это же время составляла 4,0-4,7 км. Понижение высоты слоя в середине зимы до 92-93 км сопровождалось увеличением его ширины до 5,0-5,5 км и примерно совпадало с сезонным повышением концентрации натрия в вертикальном столбе, которое наблюдается на прибрежных станциях.

Относительные изменения концентрации натрия в столбе в течение трех ночей августа 1989 года, показанные в качестве примера на рис. 3, достигали $\pm (25-35)\%$, это обусловлено приливными эффектами и вариациями притока частиц.

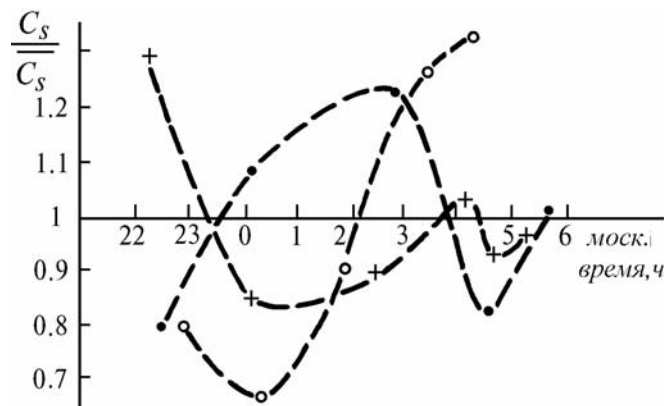


Рис. 3. Вариации концентрации натрия в столбе

Выводы.

1. Впервые для континентальных условий мезосферы организован мониторинг натриевого слоя.

2. Сезонные изменения концентрации в столбе, отмеченные в осенний период, зависят в основном от расширения нижней части натриевого слоя и объясняются изменением

фотохимии восстановления натрия при повышении температуры мезосферы в начале зимы. Аналогичные результаты наблюдались на станциях, расположенных вблизи океана.

3. Выявленная аномалия концентрации натрия в столбе в августе, обусловленная притоком крупных частиц потока Персеид, в значительной мере маскируется суточными приливными колебаниями плотности атмосферы.

1. Лагутин М. Ф. // *Астрономический вестник*. 1974. Т. 8. N 3. С. 145.
2. Лагутин М. Ф., Андрущенко О. И., Бабенко О. А. // *Известия АН ТССР*. 1976. N 6. С. 61.
3. Gibson A. J., Sanford V. C. W. // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1971. V. 33. P. 1675.
4. Megie G., Blamont J. E. // *Planet. Space Sci.* 1977. V. 25. P. 1093.
5. Kamijama H., Fumihiko T. // *Handbook vor MAP*. 1985. V. 18. P. 253.
6. Kirchoff V. W. J. H., Clemesha B. R. // *J. Atmosp. Terr. Phys.* 1973. V. 35. P. 1493.
7. Gardner C. S., Voelz D. G., Sechrist C. F., Segal A. C. // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. NA12. P. 13.659.
8. Тулинов Г. Ф., Дудолодов Ю. П., Шанен М. Л., Мэжи М. // *Ионосферные исследования*. 1982. N 32. С. 104.
9. Лагутин М. Ф., Мегель Ю. Е., Зарудный А. А. и др. // *ДАН*. 1981. Т. 258. N 2. С. 334.
10. Nomura A. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 1978. V. 14. P. 700.
11. Ovezgeldyev O., Lagutin M. F. et al. // *Handbook for MAP*. 1987. V. 25. P. 405.
12. Зарудный А. А., Метель Ю. Е., Лагутин М. Ф. // *Оптика атмосферы*. 1988. Т. 1. N 6. С. 83.
13. Lagutin M. F., Zarudny A. A., Verchorobin A. I., Torzhkov V. P., Melnikov V. E. // *Abstr. of papers of The Fifteenth International Laser Radar Conference. Part 1. Tomsk, 1990*. P. 135.

Харьковский институт радиоэлектроники

Поступила в редакцию
10 октября 1992 г.

M. F. Lagutin, A. A. Zarudny, A. L. Verchorobin, V. P. Torzhkov. Results of Experimental Studies of Dynamics of Sodium Layer Parameters.

Regular sodium layer observations in Touapse were performed to investigate the layer parameters dynamics. The transmitting equipment of the resonance lidar includes the tunable flash lamp-pumped laser (589 nm; 8 pm; 0.5 J). The spatial resolution of the system is 1 km.

There were 32 nights of measurements during a year and about 5 or 6 measurement cycles (30-50 min) each night. The average layer altitude was 94 km and the rms width was 3.7 to 6.0 km.

Significant increase of concentration was observed in August and was explained by the matter influx from the large particles of the meteor shower.