

В.П. Лукин, А.Э. Меламуд

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОЙ РЕФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОРОТКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРАССАХ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Проводится обобщение нескольких циклов экспериментальных исследований рефракции лазерного излучения на коротких горизонтальных трассах в приземном слое атмосферы. Исследуется эффективность алгоритмов прогноза величины рефракции по данным оперативных измерений средних значений метеопараметров.

Регулярная вертикальная рефракция лазерного излучения является существенной помехой при работе лазерных измерительных систем в приземном слое атмосферы. Рефракционные искажения вызывают отклонения оси лазерного излучения от своего первоначального направления и могут достигать даже на коротких горизонтальных трассах протяженностью до 2000 м значений  $1'$  и выше при средней высоте распространения излучения над поверхностью земли 1–3 м. Такие условия характерны для целого класса локационных задач, в частности, при использовании лазерных опорных систем, однако специфика рефракции лазерного излучения в указанном случае исследована недостаточно полно.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию рефракции лазерного излучения и возможности ее прогноза на основе метеоизмерений. Известно, что рефракция лазерного излучения обусловлена изменением показателя преломления среды вдоль трассы распространения. В свою очередь эти изменения определяются изменением температуры воздуха и ее градиента в слое прохождения излучения [1] (вклад других термодинамических параметров и метеорологических факторов атмосферы существенно мал).

Исходя из этого, мы сформулировали первую экспериментальную задачу как поиск корреляционных взаимосвязей между величиной линейного смещения оси лазерного излучения  $\Delta$  от исходного направления на фиксированной дальности  $L$  для длины волны излучения  $\lambda$  и метеопараметров атмосферы — температуры  $T$  и разности температуры  $\Delta T$  на двух уровнях в слое прохождения лазерного излучения. В рамках этой задачи возможно построение эмпирического алгоритма прогноза величины  $\Delta$  по данным оперативных измерений  $\Delta T$  (в начале трассы) путем составления регрессионных уравнений в виде:

$$\Delta = A(L) + B(L)\Delta T, \quad (1)$$

где  $A(L)$ ,  $B(L)$  — коэффициенты, зависящие от протяженности трассы  $L$ .

При решении поставленной задачи основу методики составили параллельные синхронные измерения флуктуаций положения оси излучения в конце и профилей температуры и скорости ветра в начале трассы. Измерения проводились суточными циклами на дальностях 100–2000 м на однородных участках земной поверхности при средней высоте распространения пучка лазерного излучения 2 м. В эксперименте использовались лазерный излучатель (длина волны 0,6328 мкм, мощность 0,5 мВт), фотоприемное устройство с погрешностью измерения положения оси лазерного излучения  $\pm 10$  мм, стандартные метеорологические приборы для измерения метеопараметров [2]. С целью получения достоверных результатов исследования проводились в различных климатических зонах: в Поволжье, Крыму и Западной Сибири. В последнем случае применялось нестандартное оборудование, которое позволило уменьшить погрешность измерения величины  $\Delta$  до  $\pm 100$  мкм, а  $\Delta T$  —  $\pm 0,1^\circ$ .

Полученные экспериментальные данные (всего около 30 суточных циклов) использовались для составления эмпирических регрессионных уравнений, необходимых при разработке алгоритма прогноза величины  $\Delta$ . При этом в соответствии с [3] данные были разбиты на группы по дальностям и режиму стратификации (по параметру Ричардсона  $Ri$ ) для каждого региона. Разбиение по классам в соответствии с режимом стратификации производилось с учетом погрешности измерения разности температур  $\Delta \tilde{T}$ . Было выделено четыре класса: I класс (неустойчивая стратификация) —  $\Delta T < -\Delta \tilde{T}$ ; два класса безразличной стратификации — II класс  $0 > \Delta T > -\Delta \tilde{T}$ , III класс  $\Delta \tilde{T} > \Delta T > 0$ ; IV класс (устойчивая стратификация) —  $\Delta T > \Delta \tilde{T}$ . Для каждой группы данных и соответствующего уравнения регрессии рассчиты-

вались доверительные интервалы.

Ранее в [3] на основе теории подобия рассчитаны алгоритмы прогноза величины амплитуды рефракции

$$\Delta = 0,46 \cdot 10^{-6} L^2 \begin{cases} 0,0367 - 0,72\Delta T/z, & |\Delta T| < \Delta \bar{T}, \\ 0,0367 + 2,14\Delta T/z, & \Delta T < -\Delta \bar{T}, \\ 0,0367 - 0,66\Delta T/z, & \Delta T > \Delta \bar{T}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $L$  — дистанция (в м),  $\Delta T$  — разность температур воздуха (в °C), измеренная на высотах  $2z$  и  $z/2$ ,  $z$  — средняя высота пучка над поверхностью земли (в м),  $\Delta \bar{T}$  — погрешность измерения разности температур (в °C). На рис. 1 показаны результаты сравнения эмпирических линий регрессии с рассчитанными по формуле (2). Экспериментальные результаты получены для дистанции 500 м в двух основных режимах стратификации ПСА — неустойчивом (I класс) и устойчивом (IV класс). На рис. 1,а 1, 2, 3 — регрессионные линии, соответственно полученные в экспериментах в Поволжье, Крыму и Западной Сибири, 4 — теоретические линии по формуле (2); пунктиром показаны доверительные зоны для эмпирических линий регрессии. На рис. 1,б приведен характерный суточный ход измеренных параметров  $\Delta T$  и  $\Delta$  (на дальности 500 м).

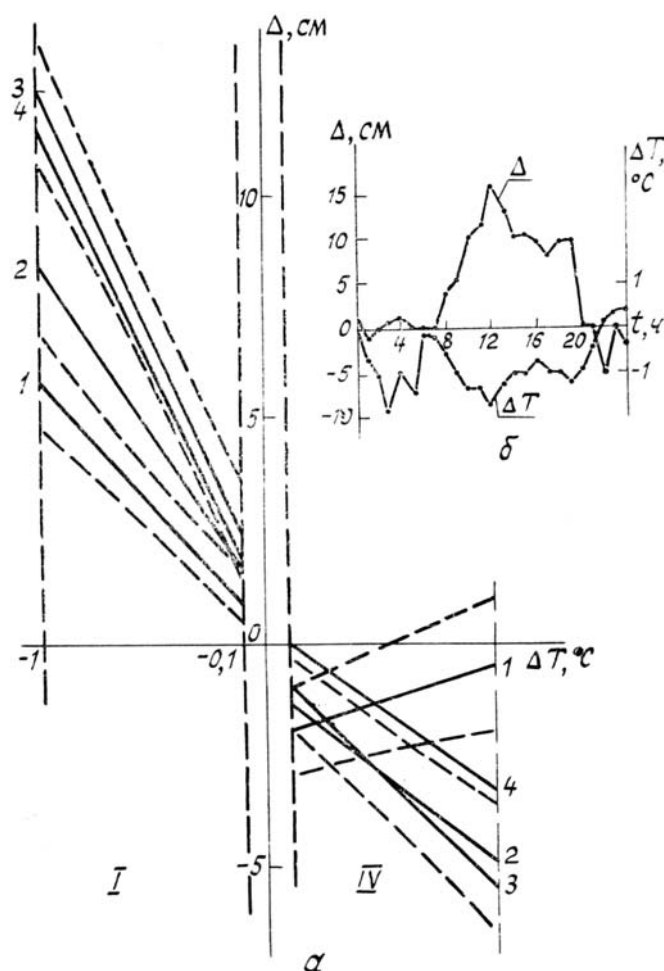


Рис. 1. Сравнение эмпирических линий регрессии рефракционных искажений с рассчитанными по формуле (2), полученных для дальности 500 м

Анализ результатов первой группы экспериментов позволяет сделать следующие выводы.

1. В любой климатической зоне на коротких горизонтальных трассах в ПСА величина регулярной рефракции лазерного излучения имеет характерный суточный ход (рис. 1,б) с максимальной амплитудой флуктуаций  $\pm 1'$ .

2. С учетом погрешности экспериментального алгоритма прогноза (на дальности 500 м с 95%-й вероятностью  $\pm 30$  мм) границы применимости программных методов коррекции регулярной рефракции — короткие трассы до 500 м, режим неустойчивой стратификации. В этой области прогноз воз-

можен с погрешностью  $\sim 20\div 30\%$ .

В приведенном выше алгоритме прогноза регулярной рефракции предполагается, что кривизна траектории лазерного излучения по трассе распространения постоянна, а зависимость угла рефракции от дистанции распространения линейна [4].

Вторая группа экспериментальных исследований была направлена на проверку предположения о постоянстве кривизны траектории. Для этого синхронно в двух точках трассы (на расстоянии 250 и 500 м) стандартным методом теодолитом типа ОТ-02 измерялся угол рефракции. Средняя высота прохождения визирного луча над однородной земной поверхностью составляла 1,5 м. Результаты измерений в графическом виде приведены на рис. 2, где по оси ординат отложены линейные значения углов рефракции в середине  $r_1$  и в конце  $r_2$  трассы протяженностью 500 м. Измерения были начаты в 18 ч одних суток и закончены в 22 ч следующих. Анализ полученных в этом эксперименте данных позволяет сделать вывод о непостоянстве кривизны траектории излучения на коротких горизонтальных трассах, особенно в режимах устойчивой и безразличной стратификации приземного слоя атмосферы. В режиме неустойчивой стратификации зависимость угла рефракции от дальности практически линейна (рис. 2, от 10 до 18 ч), что подтверждает выводы, сделанные из анализа первой экспериментальной группы данных.

Наконец, еще одной задачей явилось экспериментальное исследование зависимости регулярной рефракции от степени когерентности источников излучения. Методика эксперимента состояла в синхронных измерениях углов рефракции на одной и той же трассе полностью некогерентного источника излучения (геодезической марки днем и электрической лампочки — ночью) с помощью теодолита и когерентного источника (газового лазера на длине волны 0,6328 мкм) — лазерной измерительной системой [2, 3].

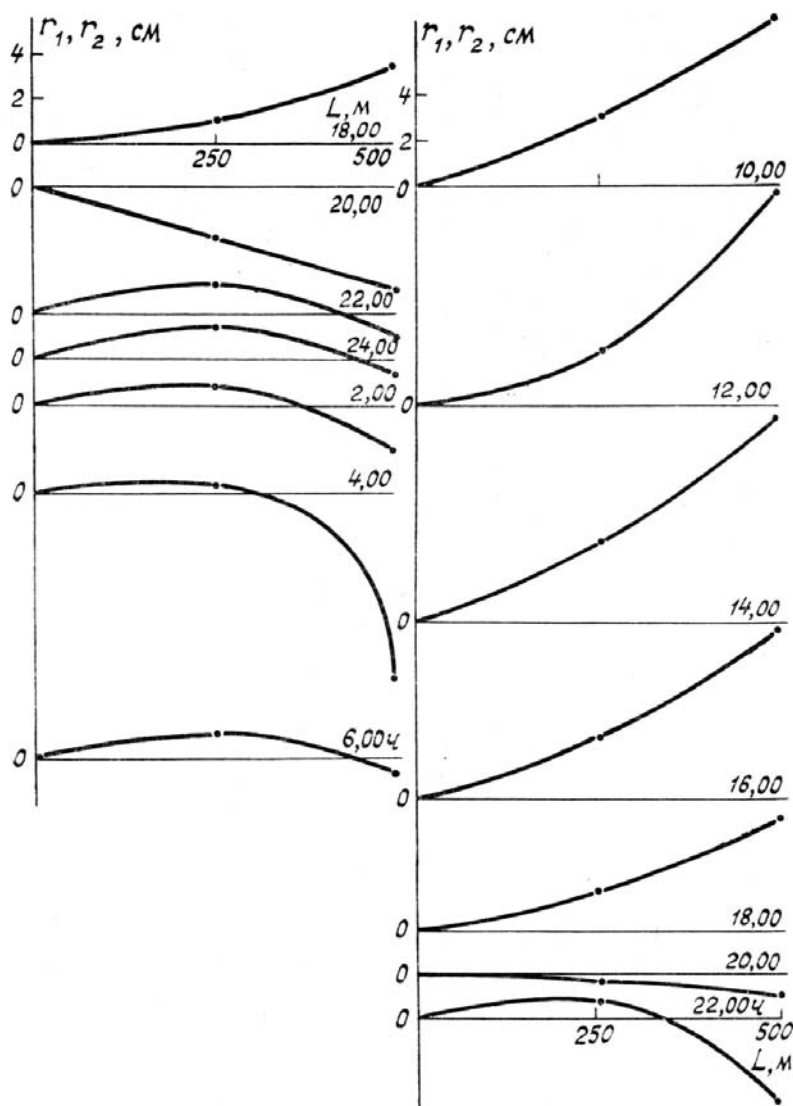


Рис. 2. Временной ход рефракционных искажений на дальностях 250 и 500 м

В результате проведенных исследований получено, что линейное значение регулярной рефракции когерентного источника излучения в среднем в два раза превышает рефракцию некогерентного источника [4]. Теоретические расчеты, приведенные в [5], подтверждают полученный экспериментальный эффект.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования достоверно показали, что регулярная рефракция лазерного излучения на коротких приземных трассах имеет характерные особенности и нуждается в дальнейшем детальном изучении, особенно в связи с широким внедрением в современные технологии лазерных измерительных и опорных систем.

1. Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин И.Т. Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы). Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.
2. Лукин В.П., Меламуд А.Э., Миронов В.Л. Экспериментальное исследование влияния атмосферной рефракции на работу лазерных опорных систем // Изв. вузов. Физика. Томск, 1984. 21 с. Деп. в ВИНТИ № 6774-84.
3. Лукин В.П., Меламуд А.Э., Миронов В.Л. //Изв. вузов, сер. Физика. 1985. № 8.С. 51–56.
4. Меламуд А.Э. Разработка физических принципов адаптации лазерных опорных систем в приземном слое атмосферы. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, Томск, 1986. 15 с.
5. Банах В.А., Меламуд А.Э., Миронов В.Л. и др. //Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62. Вып. 5. С. 1136–1140.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
6 июля 1988 г.

**V. P. Lukin, A. E. Melamud. Experimental Study of Laser Radiation Regular Refraction on Short Horizontal Paths in the Ground Atmospheric Layer.**

The paper summarizes the results of several cycle of experimental investigations into the refraction of laser radiation on short horizontal paths in the ground atmospheric layer. Efficiency of algorithms for forecasting the refraction value based on the data on measured meteorological parameters is analyzed.