

УДК 621.375:524.1

А. В. АЛЕКСЕЕВ, Д. И. МАСЛИЧ, С. С. ПЕРИЙ, С. Г. САВЧУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЛАЗЕРНЫХ ЛУЧЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ СИНХРОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОНЦАХ ТРАССЫ

Возможности лазерных приборов и систем для расстояний более 1 км используются не полностью из-за влияния рефракции земной атмосферы, методы учета которой разработаны недостаточно. О необходимости определения методики учета рефракции лазерных лучей отмечено в решении Всесоюзного совещания по рефракции электромагнитных волн в атмосфере (Томск, 1983).

Проведение таких исследований — задача нелегкая из-за отсутствия лазерных теодолитов и невозможности фиксации быстрых флуктуаций лазерного пятна в пункте приема излучения [4, 6].

Для этой цели была оборудована наблюдательная станция, которая состояла из двух пунктов наблюдения: «База» и «Яр» (рис. 1). П. «База» располагался на возвышенном берегу в 100 м от озера, а «Яр» — на окраине села на крутом склоне; к обоим пунктам было подведено электропитание. На каждом из них были установлены: лазер с коллиматором, теодолит ОТ-02, плексигласовый экран с наклеенной миллиметровой бумагой размерами 180×120 см, метеомачта для измерений температуры психрометрами, радиостанция для осуществления связи. Приборы находились под брезентовым тентом. Местность в районе станции холмистая, климат умеренный. В период наблюдений ясная погода чередовалась с облачной и с частыми дождями.

Профиль линии между пунктами показан на рис. 1. Длина трассы 3011,43, а разность высот 7,089 м. Измерения зенитных расстояний и фиксацию лазерного пятна на обоих пунктах осуществляли синхронно, что позволило получить более полную картину пространственно-временной изменчивости рефракционного поля.

Одновременные двухсторонние наблюдения с использованием лазерного луча производили в ночное время суток в августе. В качестве источника излучения использовали два лазера ЛГ-72 ($\lambda = 0,6328$ мкм). При задании в пространстве опорной линии регистрацию положения центра лазерного пятна на приемном экране выполняли визуально.

Каждую серию наблюдений выполняли через 30 мин двумя приемами измерения зенитного расстояния, четырьмя приемами фиксации нижнего и верхнего концов лазерного пятна на экране по миллиметровой бумаге и измерением метеоэлементов.

Источники лазерного излучения работали в «импульсном» режиме, время излучения при одном приеме в целях исключения ошибки от нагрева лазера — 10 с [1].

В начале и в конце каждой серии наблюдений измеряли температуру воздуха на высотах 0,5, 1,5, 3,0 м от подстилающей поверхности, атмосферное давление. Учитывали также направление и скорость ветра, условия погоды.

В соответствии с описанной программой и методикой определяли рефракцию видимого света в дневной период с п. «База»

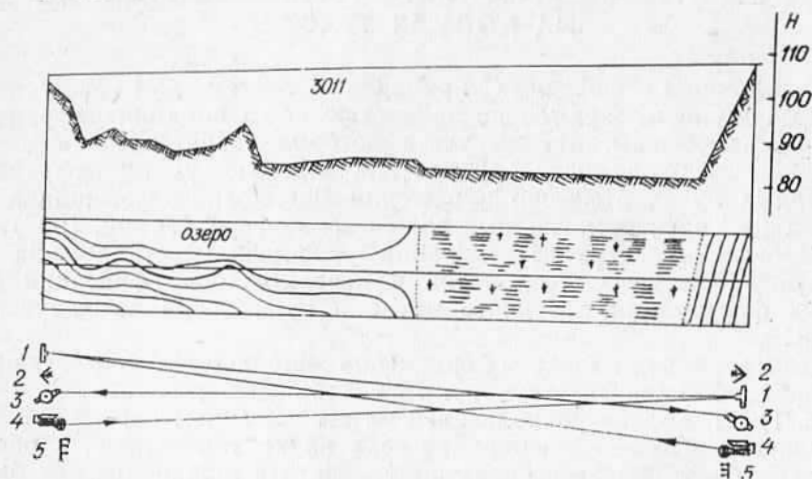


Рис. 1. Схема наблюдательной станции с профилем трассы и ходом лучей от теодолита и лазера:

1 — экран с фонарем; 2 — радиопередатчик; 3 — теодолит; 4 — лазерный прибор; 5 — метеомачта.

в течение шести дней, а также рефракцию светового и лазерного лучей на п. «База» и «Яр» в ночной период в течение одиннадцати ночей.

Рассчитаем предварительную точность полученных величин. Известно, что рефракция определяется как разность теоретического z_0 и измеренного z зенитных расстояний

$$r = z_0 - z. \quad (1)$$

Среднюю ошибку определения угла рефракции находим из выражения

$$m_r = \pm \sqrt{m_{z_0}^2 + m_z^2}. \quad (2)$$

Средняя величина m_z не превышает $2,0''$, а средняя ошибка $m_{z_0} = 0,6''$. Тогда ожидаемая ошибка в измерении угла рефракции будет $m_r = 2,1''$. Среднюю ошибку определения центра пятна находим по ошибке отсчетов краев лазерного пучка

$$m_{\text{ц}} = \pm \sqrt{2m_{\text{кр}}^2} = m_{\text{кр}} \sqrt{2}; \quad m_{\text{кр}} = \pm 10 \text{ мм}; \quad m_{\text{ц}} = \pm 14 \text{ мм}. \quad (3)$$

Ошибка определения центра пятна из четырех измерений будет в два раза меньше: $m_{\Delta} = \pm 7$ мм. Разница центров даст ошибку $m_{\Delta\Delta} = m_{\Delta} \sqrt{2} = 10$ мм. Угловые смещения лазерного пятна вычисляем из выражения

$$m_{\Delta}^* = \pm \rho \frac{m_{\Delta\Delta}}{L}. \quad (4)$$

Тогда $m_{\Delta}^* = 0,7''$. Предельная ошибка определения смещений центра $m_{\Delta, \text{пр}} = 2m_{\Delta}^* = 1,4''$, что несколько выше точности определения углов рефракции светового луча.

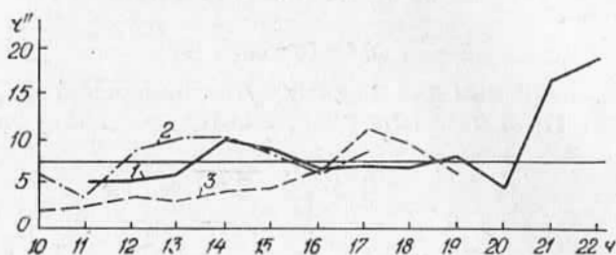


Рис. 2. Почасовой ход рефракции видимого света в дневной период:

1 — для первого дня наблюдений; 2 — для второго дня; 3 — для третьего дня; 4 — значение угла рефракции для нейтральной стратификации.

Предварительная обработка материалов наблюдений заключалась в определении средних значений измеренных зенитных расстояний в каждой серии (среднее из двух приемов), рефракции и коэффициента рефракции для светового луча. Ввиду того что каждую ночь производилась подстройка лазерного излучателя, одно из положений центра лазерного пятна принимали равным соответствующему на период измерений зенитному расстоянию. Затем по смещению центра лазерного пятна от его выбранного положения вычисляли рефракцию лазерного луча. По результатам метеоизмерений в каждой серии определяли температурный градиент на обоих пунктах.

В результате обработки материалов был определен средний почасовой ход рефракции видимого света в дневной период с п. «База» в течение шести дней при различных условиях погоды. Ее значение и изменения (рис. 2) были близки к нормальным, и лишь после периодов вечерних спокойных изображений рефракция резко возрастала. При переменной облачности значение рефракции меньше, чем при ясной погоде. Все это указывает на обычное строение рефракционного поля в дневной период на данной трассе [2].

Для анализа пространственно-временной изменчивости рефракции лазерного луча, ввиду обширности наблюдений в течение 11 ночей первоначально были вычислены средние значения рефракции, уширения лазерного пятна и положение его середины

для каждой ночи наблюдений. Кроме того, для сравнения хода рефракции лазерного луча и видимого света были построены графики их почасового хода на каждом пункте в отдельности.

Анализ построенных графиков получасовых изменений рефракции показал, что исследуемый район характеризуется небольшой рефракцией. Большое влияние на строение воздушных масс оказывают озеро и долина (см. рис. 1). Максимальное значение углов рефракции в исследуемый период не превосходит $+29''$ на п. «База» и $+34''$ — на п. «Яр».

Для выяснения степеней зависимости изменения рефракции видимого света r_c и лазерных лучей r_l вычислены разности углов рефракции

$$\Delta r = r_c - r_l. \quad (5)$$

По этим значениям для каждых суток измерений находим средние значения r_{cp} и среднюю квадратическую ошибку $m_{\Delta r}$ по формуле

$$m_{\Delta r} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \quad (6)$$

где v — отклонение от Δr_{cp} ; n — количество измерений.

В значение Δr_{cp} входит систематическая погрешность определения лазерной рефракции, а $m_{\Delta r}$ указывает на случайное отклонение разностей рефракции. Значение Δr_{cp} большей частью зависит от начального момента измерений.

В табл. 1 приведены значения Δr_{cp} и $m_{\Delta r}$. Средняя квадратическая ошибка $m_{\Delta r}$ находится в пределах $3''$, что говорит о наличии устойчивости корреляционной связи между рефракциями обоих излучений. Увеличение средней квадратической ошибки 28 и 29 августа объясняется непрерывной работой лазерных источников излучения, при которой лазеры разогреваются и добавляется дополнительный источник изменения направления лазерных лучей.

Отметим, что период наблюдений характеризовался в основном положительной рефракцией, которая почти всегда превосходит нормальное значение.

Измерение температуры в трехметровом слое воздуха показало, что с высотой температура возрастает, т. е. преобладает инверсионное строение приземного слоя атмосферы, временами неустойчивое. Неустойчивость слоя инверсии приводит к тому, что коэффициенты рефракции достигают больших значений ($+0,60$) и сильно колеблются во времени.

В ночной период особенно выраженных изменений рефракции в зависимости от условий погоды не наблюдалось. Правда, для безоблачных и облачных ночей небольшое отличие имелось. Так, на п. «База» 12—13 августа (облачно) максимальное изменение достигало $8''$, на п. «Яр» в ту же ночь — тоже $8''$.

Аналогичные данные получены 23, 27—28 августа (все эти дни было облачное небо). В безоблачные ночи, например, 16—17, 25—26, 29 августа колебания рефракции достигали $25 \dots 30''$.

Рассмотрим теперь вычисленные коэффициенты рефракции раздельно по пунктам наблюдения. Как уже отмечалось, вычисленные коэффициенты рефракции почти всегда превосходили нормальное его значение, равное 0,14. На п. «База» значительная часть вычисленных коэффициентов близка к нормальному значению и даже меньше его (+0,07), но наличие инверсии приводит к тому, что наблюдаются большие коэффициенты рефракции. И лишь 23—24 августа, когда преобладали небольшие отрица-

Таблица 1

Разности средних значений рефракции
лазерного луча и видимого света

Дата, август, 1983	п. «База»			п. «Яр»		
	n	$\Delta r_{\text{ср}}$	$m \Delta r$	n	$\Delta r_{\text{ср}}$	$m \Delta r$
12—13	15	0,8"	1,27"	15	-1,0"	1,88"
16—17	12	-2,4	1,14	11	-1,2	2,24
17—18	11	-5,5	2,45	11	7,5	4,70
18—19	16	-1,9	1,31	16	3,5	2,36
23	13	-0,6	1,00	13	1,7	1,47
23—24	13	-1,1	1,66	12	3,8	2,33
24—25	17	0,3	1,28	17	2,7	3,10
25—26	16	-2,0	1,88	14	2,9	3,62
26—27	12	0,2	2,12	12	2,0	2,01
28	13	-0,4	1,25	13	6,1	3,90
29	12	4,6	3,56	12	6,5	3,96

тельные температурные градиенты (а были и нулевые), коэффициент рефракции был близок к нормальному и изменялся в небольших пределах (+0,07...+0,21).

Хотя измерения зенитных расстояний выполнялись одновременно на п. «База» и «Яр», следует заметить, что различия измеренных значений рефракции на обоих пунктах все же значительны.

Кроме причин, вызванных различием эквивалентных высот, это можно объяснить также тем, что инверсия температуры достигает больших значений. Так, на протяжении всего периода измерений градиенты температуры находились в пределах +0,8...+0,2°/м, и соответственно коэффициенты рефракции изменялись от +0,17 до +0,75.

Таким образом, в периоды с преобладающим инверсионным строением приземного слоя воздуха, наблюдаются резкие изменения коэффициента рефракции (от +0,09 до +0,80). Колебание угла рефракции для безоблачных ночей составляет 25...30", а для облачных — 7...10". Различие коэффициентов рефракции на п. «База» и «Яр» объясняется различными эквивалентными высотами между пунктами и степенью устойчивости слоя инверсии в периоды измерений.

Перейдем к анализу рефракции лазерных лучей.

При распространении в турбулентной атмосфере параметры лазерного пучка будут флуктуировать по случайному закону. При-

менительно к специфике геодезических измерений нас в первую очередь будут интересовать следующие искажения поля лазерного излучения: отклонение угла прихода от направления оптической оси; смещение пучка относительно его центрального положения; флуктуации поперечного сечения пучка; флуктуации направления отдельных лучей в пучке.

Искажения поля лазерного пучка, согласно первым двум пунктам, вызывают случайные смещения центра лазерного пятна, а

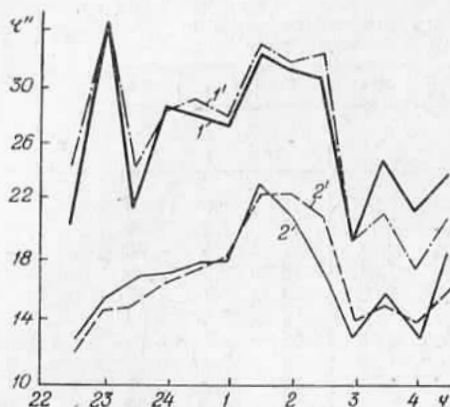


Рис. 3. Временной ход рефракции лазерного луча и видимого света:

1 — лазерного луча на п. «База»; 1' — видимого света на п. «База»; 2 — лазерного луча на п. «Яр»; 2' — видимого света на п. «Яр».

случайные изменения диаметра пучка характеризуют искажения, выраженные последними двумя пунктами.

С целью исследования указанных параметров лазерного пучка и определения связи последних с изменением рефракции светового диапазона используем совместные наблюдения параметров лазерного излучения (центра лазерного пятна и его диаметра) и измерения рефракции видимого света (рис. 3).

Для анализа флуктуаций смещений лазерного пучка находили дисперсию смещений центра пятна за весь период измерений. Из измеренных дисперсий, полученных по результатам отклонения центра лазерного пятна от пятиминутного усреднения, вычисляем структурную функцию изменений показателя преломления [6]:

$$C_n = 1,14 \sigma_n a^{1/6} L^{-3/2}, \quad (7)$$

где σ_n — дисперсия смещений пучка; a — эффективный радиус пучка, который в режиме фокусировки не превышает диаметра излучающей апертуры; L — длина трассы.

По данным измерений получаем диаметр лазерного пятна и его дисперсию, среднее значение угла вертикальной рефракции и дисперсию флуктуаций измеренных зенитных расстояний за весь период наблюдения (табл. 2).

Для выявления зависимости между временным ходом параметра C_n и диаметром лазерного пятна d , а также между ходом

Характеристики параметров лазерного пятна

Дата, август 1983	п. «База»								п. «Яр»								Погода
	n	m _d см	d _{cp} см	m _ц см	m _ц	m _z	r _{cp}	C _n , см ^{-1/2} × 10 ⁻⁷	m _d см	d _{cp} см	m _ц см	m _ц	m _z	r _{cp}	C _n , см ^{-1/2} × 10 ⁻⁷		
12—13	15	2,0	40,6	3,9	2,7 ^z	2,5 ^z	8,9 ^z	0,30	1,1	8,6	2,0	1,4 ^z	2,5 ^z	11,1 ^z	0,15	облачная	
16—17	12	2,8	38,7	4,3	3,0	3,6	13,4	0,33	3,4	15,7	8,0	5,6	6,0	21,2	0,62	безоблачная	
17—18	10	0,9	33,1	3,5	2,4	1,5	13,4	0,27	1,6	9,7	7,4	5,1	2,9	18,3	0,57	переменная	
18—19	15	2,4	30,8	3,2	2,2	3,0	12,9	0,25	0,8	13,0	10,5	7,2	3,4	14,6	0,80	переменная	
23	13	1,8	23,5	1,1	0,8	1,6	7,7	0,08	0,4	19,8	3,2	2,2	1,8	9,8	0,25	облачная	
23—24	13	1,9	18,0	4,9	3,3	3,0	16,8	0,38	1,7	19,4	7,6	5,2	4,6	26,6	0,58	переменная	
24—25	17	0,6	34,4	2,3	1,6	2,1	12,8	0,17	1,2	9,6	6,7	4,6	4,2	16,4	0,52	переменная	
25—26	17	2,0	37,7	4,8	3,3	3,9	14,1	0,37	1,8	13,5	12,6	8,6	6,9	19,8	0,97	безоблачная	
26—27	16	3,7	29,6	3,2	2,2	2,3	11,0	0,25	2,1	14,0	5,4	3,7	3,0	17,6	0,42	переменная	
28	14	1,7	38,6	4,0	2,8	2,5	11,1	0,31	1,5	13,0	6,3	4,3	4,7	20,8	0,48	облачная	
29	12	1,7	38,3	6,0	4,1	6,0	15,4	0,46	2,5	12,2	12,2	8,4	6,2	24,0	0,94	безоблачная	

C_n и изменениями рефракции видимого света построены графики (рис. 4, а, б).

Из анализа табл. 2 и графиков следует:

дисперсия флуктуаций центра пятна по своему значению близка к соответствующей дисперсии угла рефракции;

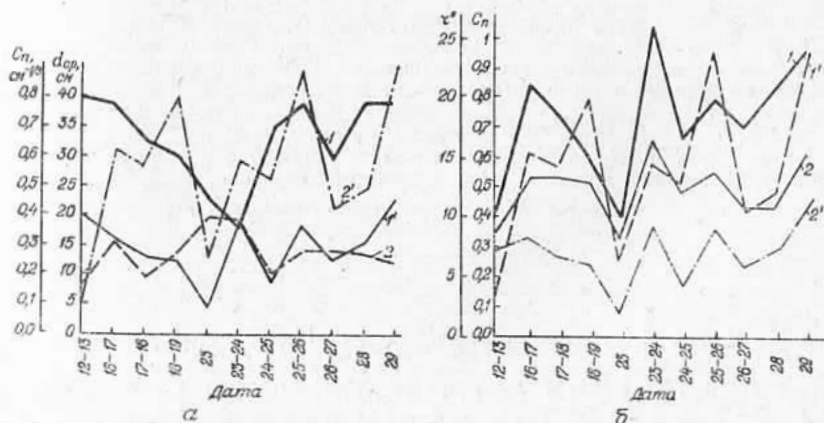


Рис. 4. Изменения диаметра лазерного пятна в зависимости от структурной характеристики C_n (а) (1 — временной ход диаметра лазерного пятна на п. «База»; 1' — временной ход параметра C_n на п. «База»; 2 — временной ход диаметра лазерного пятна на п. «Яр»; 2' — временной ход параметра C_n на п. «Яр»); зависимость рефракции видимого света и структурной характеристики C_n (б) (1 — временной ход рефракции видимого света на п. «База»; 1' — временной ход параметра C_n на п. «База»; 2 — временной ход рефракции видимого света на п. «Яр»; 2' — временной ход параметра C_n на п. «Яр»).

значение дисперсий центра лазерного пятна и угла рефракции больше для тех периодов, когда и сам угол рефракции большой. При угле рефракции, близком к нормальному (периоды спокойных изображений), дисперсии флуктуаций центра пятна и угла рефракции минимальны. Из рис. 4, а видна некоторая зависимость между временным ходом диаметра пятна и параметра C_n , более определенно представляется зависимость рефракции и параметра C_n (см. рис. 4, б). Определяя структурную характеристику C_n по дисперсии флуктуаций центра лазерного пятна (7), можно найти угол рефракции.

Таким образом, дисперсия флуктуаций углов рефракции и центра лазерного пятна — важная характеристика для прогнозирования значений рефракции лазерного луча, которую можно определить в процессе наблюдений.

Устройство описанной наблюдательной станции и постановка синхронных измерений рефракции видимого света и лазерных лучей на концах трассы позволяют получить детальную картину изменения рефракционного поля в пространстве и во времени. Исследования прежде всего показали большую корреляцию действия рефракции на зенитные расстояния обычного источника света и лазерного луча, если лазер работает в «импульсном» режиме. При анализе флуктуаций центра лазерного пятна оказалось, что амплитуда отклонений меняется в зависимости от изменений рефракции лазерного луча и обусловлена изменением структурной характеристики поля показателя преломления.

Список литературы: 1. Алексеев А. В., Перий С. С. О преломлении оптических лучей различной степени когерентности. — В кн.: Всесоюзное совещ. по рефракции электромагнитных волн в атмосфере: Тез. докл. Томск, 1983. 2. Маслич Д. И. Некоторые общие закономерности влияния вертикальной рефракции на точность геодезического нивелирования. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1969, вып. 9. 3. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. — Новосибирск: Наука, 1981. 4. Перский М. И., Виноградов И. В. Исследование лазерного визира ЛВ-5М. — Тр. МИИЗ, 1977, вып. 90. 5. Фейзулин З. М., Кравцов Ю. А. К вопросу о расширении лазерного пучка в турбулентной среде. — Изв. вузов. Радиофизика, 1967, т. 10, № 1.