

УДК 551.593.1:528.022.2

*А. С. АЛЕКСАНЫЯ, Ю. Х. АЮНЦ, К. П. ПОГОСЯН*  
Институт физических исследований АН АрмССР

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

При использовании лазерного луча в геодезических измерениях, передаче с его помощью какого-либо заданного направления с одного объекта на другой, а также в ряде других случаев необходимо учитывать рефракцию луча в атмосфере. Так, при проектировании лазерных систем связи достаточно знать возможные изменения направления пучка вследствие рефракций, а не значения углов рефракции. Рефракцию пучка вызывает градиент показателя преломления воздуха, определяемый в случае земной рефракции в основном градиентом температуры. Градиент температуры приземного слоя воздуха в значительной мере зависит от подстилающей поверхности. В частности, рефракция над обширными водными поверхностями имеет ряд особенностей [1, 3, 9]. Применение лазеров при исследованиях земной рефракции позволяет в любое время суток проводить измерения традиционными методами как при распространении луча на очень большие расстояния (десятки километров), так и при сравнительно плохой видимости. Кроме того, применение лазеров сделало технически осуществимыми такие принципиально новые методы измерения рефракции, как дисперсионный [6] и интерференционный [7]. Исследования земной рефракции над сушей с использованием лазерного луча с длиной волны 0,63 мкм выполнены, например, в работах [4, 10].

Нами проведены измерения суточных изменений угла рефракции лазерного луча с длиной волны 10,6 мкм при распространении на трассе длиной  $L=14,85$  км, проходившей над озером Севан. Озеро расположено на 1900 м над уровнем моря. Измерения проводили в июле—августе 1975 г. Передающий пункт находился на высоте 17,7 м, приемный — на высоте 6 м над уровнем воды. При этом минимальная высота (относительно поверхности озера) прямой, соединяющей источник излучения с приемником, была приблизительно равна 5,5 м, а средняя по всей трассе высота той же прямой — 10 м. Удаление приемного и передающего пунктов от берега около 50 м. Источником излучения служил одномодовый углекислотный оптический

квантовый генератор типа ЛГ-30. На передающем конце трассы излучение модулировалось механическим прерывателем с частотой 30 Гц и коллимировалось зеркальной системой с диаметром выходной апертуры 50 см. Диаметр пучка на уровне  $1/e$  максимальной интенсивности на выходе коллиматора был равен 35 см, а в плоскости приема — 150 см.

На приемном конце трассы излучение принималось зеркальной телескопической системой с диаметром апертуры 30 см и эффективным фокусным расстоянием 29 м. В фокальной плоскости телескопа равномерно перемещалась узкая щель. Прошедшее через щель излучение при помощи линзы из хлористого натрия собиралось на болометр типа БКМ-5. Сигнал от болометра усиливался узкополосным усилителем, детектировался и после интегрирования RC-цепью с постоянной времени, равной 5 с, регистрировался самопишущим потенциометром типа КСП-4. Таким образом, на диаграмной ленте получались кривые, соответствующие усредненному распределению интенсивности по сечению фокального пятна. При достижении щелью одного из крайних положений на потенциометр автоматически подавался короткий импульс и соответствующая отметка на диаграмной ленте служила реперной точкой. Изменения угла рефракции определяли по изменению расстояния центра изображения фокального пятна относительно реперной отметки. Скорость перемещения щели была равна 2,24 мм/мин. Время прохождения пятна щелью примерно 1 мин. Сканирование производилось через каждые 5—10 мин. Передающая и приемная установки находились в специальных помещениях и были защищены от прямого воздействия солнечного излучения. Это в значительной мере ограждало установки от неоднородных температурных полей и делало их в механическом отношении более стабильными.

Приемный телескоп был установлен на массивной бетонной плите, наведен на источник излучения и в течение всего периода работ не требовал доворотов. Платформа, несущая источник излучения и коллиматор, при помощи поворотных механизмов доворачивалась так, чтобы на приемном конце центр лазерного пучка совмещался с центром приемной апертуры. (Повороты платформы контролировали при помощи автоколлиматоров типа АК-0,25 с ценой деления 0,25 угл. с.). Совмещение центров лазерного пучка и приемной апертуры определялось по максимуму средней интенсивности лазерного излучения, принятого болометром. Совмещение центров пучка и приемной апертуры означает, что центр изображения лазерного пучка в фокальной плоскости телескопа соответствует направлению, в котором входит в приемный телескоп рефрагированный луч, исходящий от центра выходной апертуры передающего коллиматора. Периодическое предварительное наведение центра лазерного пучка на центр приемной апертуры телескопа перед измерением угла рефракции позволило уменьшить ошибку определения

угла рефракции из-за протяженности источника излучения до значений, меньших одной угловой секунды. Необходимость доворотов лазерного пучка вызывалась также тем, что сравнительно узкий лазерный пучок постепенно «сползал» с приемного телескопа из-за рефракции.

Следует отметить, что изменения неравномерного температурного поля резонатора газового лазера могут привести к изменениям направления его излучения на 10—15 угл. с. Однако после прохождения через коллиматор угловой дрейф луча уменьшается в  $F_2/F_1$  раз, где  $F_1$  и  $F_2$  — фокусные расстояния входного и выходного зеркал коллиматора. Для описанной установки это отношение, а следовательно, и редукция дрейфа лазерного пучка были равны 20. Иными словами дрейф пучка, прошедшего через коллиматор, был меньше одной угловой секунды.

Анализ других причин, приводящих к появлению ошибок в измерениях, в том числе: а) флуктуаций интенсивности из-за турбулентности атмосферы, обуславливающих ошибку при определении центра изображения пятна на диаграмной ленте; б) нестабильность скорости двигателя, приводящая к отклонениям в равномерности перемещения щели, показал, что среднее квадратическое значение ошибок измерений не превосходит 1—2 угл. с.

При помощи описанной аппаратуры было выполнено четыре серии круглосуточных определений изменений угла вертикальной рефракции (рис. 1, а—г). Кроме того, была проведена одна круглосуточная серия определений измерений угла вертикальной рефракции лазерного излучения с длиной волны 0,63 мкм. В качестве измерительного прибора использовали жестко закрепленный автоколлиматор типа АКТ-400 с ценой деления отсчетного устройства 2 угл. с. Результаты этих измерений иллюстрирует рис. 1, д. На рис. 1 точками отмечены результаты отдельных измерений, а крестики соответствуют скользящему усреднению с интервалом усреднения в 1 ч и шагом 0,5 ч. Как видно из полученных графиков, интервал изменений угла вертикальной рефракции в разные сутки менялся от  $\Delta\gamma = 50$  угл. с до  $\Delta\gamma = 17$  угл. с.

Показатель преломления воздуха для электромагнитных волн можно рассчитать по следующей формуле [2]:

$$(n - 1) 10^6 = 18,284 \left( 1 + \frac{458,56}{146 - \frac{1}{\lambda^2}} + \frac{3,97}{41 - \frac{1}{\lambda^4}} \right) \frac{P}{T} - \left( 12,78 - \frac{0,14}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T},$$

где  $n$  — показатель преломления воздуха;  $\lambda$  — длина волны, мкм;  $P$  — давление воздуха, мб;  $e$  — парциальное давление паров воды, мб;  $T$  — абсолютная температура, погрешность

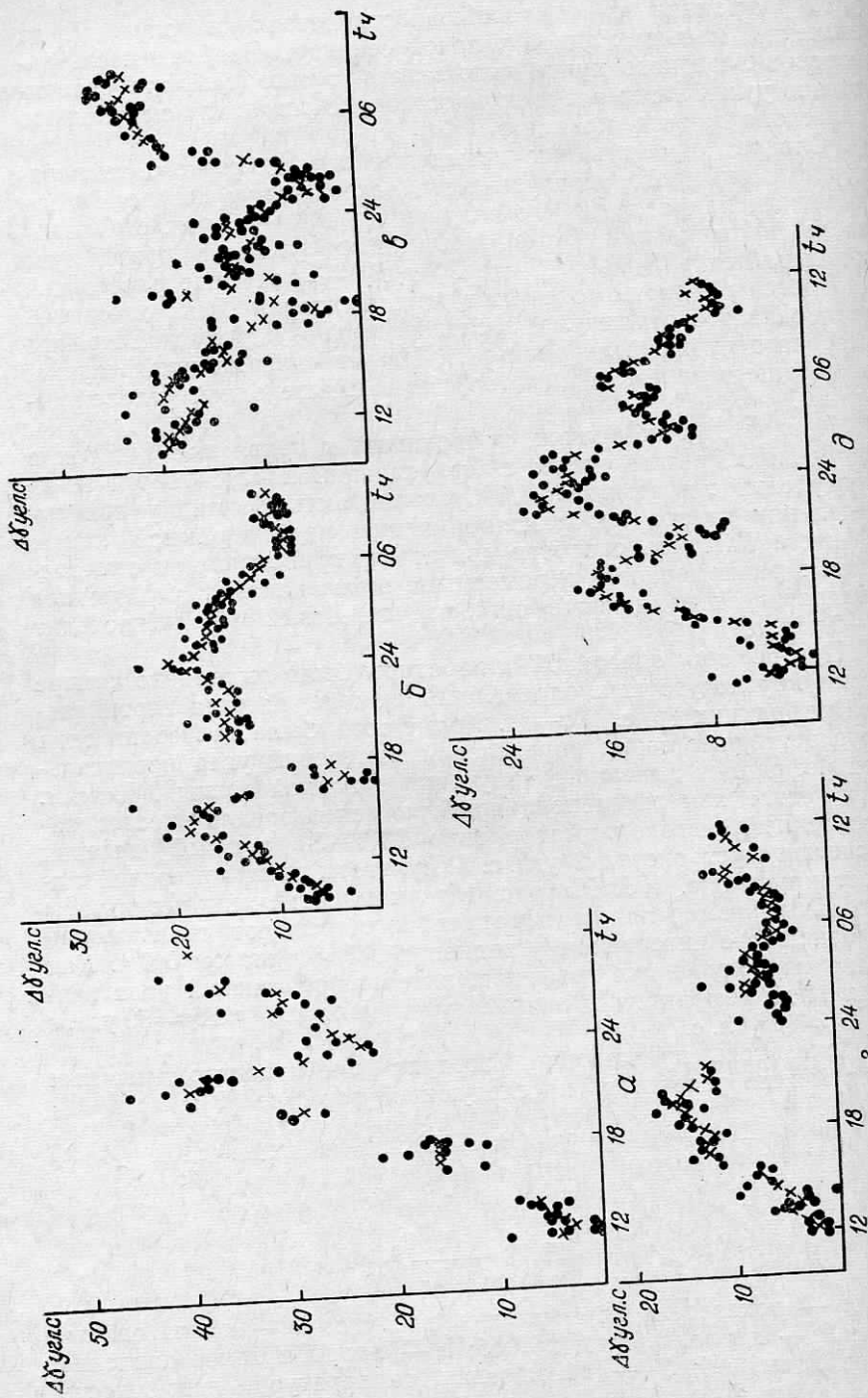


Рис. 1. Суточные изменения угла вертикальной рефракции: 1/IV—25/VII; 2—30/VII—31/VII; 3—30/VII—25/VIII; 4—7/VIII—8/VIII; 5—30/VII—25/VIII; 6—30/VII—31/VII; 7—7/VIII—8/VIII.

которой для волн с длиной от 0,2 до 10 мкм меньше 0,1%. Используя приведенную выше формулу и учитывая возможные значения вертикальных градиентов давления, влажности и температуры над водной поверхностью [5, 8], оцениваем возможные различия градиентов показателя преломления воздуха для волн длиной 0,63 и 10,6 мкм. Это различие не превышало 4%. Следовательно, различие углов рефракции лучей с длиной волны 0,63—10,6 мкм должно быть менее 4% угла рефракции и

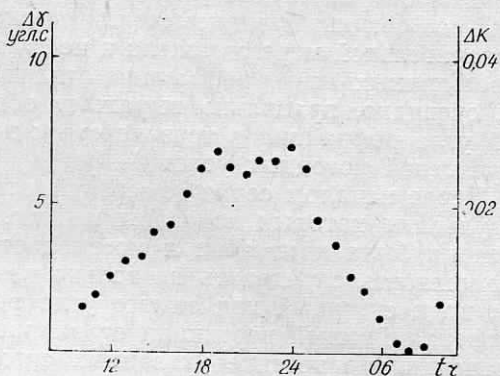


Рис. 2. Усредненный суточный ход изменений угла вертикальной рефракции по результатам пяти суток.

при описанных измерениях не превосходило двух угловых секунд, так как абсолютное значение угла рефракции, как будет показано ниже, приблизительно равно 50 угл. с. Поскольку оно мало и не может влиять на общий характер суточного изменения угла рефракции, мы сочли возможным определить усредненный суточный ход угла рефракции по результатам всех пяти суточных измерений  $T_0$ . То обстоятельство, что различие углов рефракции лазерных пучков с длиной волны 0,63 и 10,6 мкм не превышало двух угловых секунд, было проверено также экспериментально с помощью одновременного определения положения изображений этих пучков в фокальной плоскости приемного телескопа.

На рис. 2 показан график суточных изменений угла рефракции, полученный скользящим усреднением результатов пяти серий круглосуточных измерений вертикальной рефракции. Интервал усреднения — 3 ч, шаг — 1 ч. Как видно из полученного графика, в среднем наибольшие отклонения луча вверх от некоторого направления наблюдались от 18 ч 00 мин до 1 ч 00 мин, а вниз — от 6 ч 00 мин до 10 ч 00 мин. Однако, как видно из рис. 1, изменения угла рефракции, измеренные в разные сутки, резко отличаются друг от друга. Это указывает на очень сильную зависимость угла рефракции от конкретных погодных условий. Так, резкое изменение угла рефракции 24 июля в 16 ч 50 мин (рис. 1, б), а также 31 июля в 00 ч 30 мин и в 2 ч 30 мин (рис. 1, в) было вызвано дождем, который, по-видимому, существенно уменьшает вертикальный градиент

температуры. Уменьшение угла рефракции при дожде описано также в работе [1].

Наиболее часто наблюдаемая скорость изменения угла вертикальной рефракции при измерениях была равна 1,7—2,5 угл. с/ч. Наибольших значений, равных 20—30 угл. с/ч, скорость изменения угла рефракции достигала во время и после дождя. Следует отметить, что вследствие большого различия кривых суточного изменения угла рефракции для разных суток зависимость изменений угла рефракции от времени, усредненная по результатам измерений нескольких суток (рис. 2), в значительной мере сглажена и не дает полного представления о возможных из-за рефракции отклонениях световых пучков, но, очевидно, правильно выражает общую тенденцию изменений угла рефракции в течение суток независимо от случайных отклонений погодных условий.

Перед началом серии измерений, выполненных 30—31 июля, результаты которых показаны на рис. 1, *в*, ось приемного телескопа была привязана к местной отвесной линии. Это дало возможность определить не только изменения угла рефракции  $\Delta\gamma$ , но и суточный ход самого угла рефракции (без учета отклонения местной вертикали от направления к центру Земли). Значения  $\gamma$  в течение указанных суток оказались в пределах 13—40 угл. с, что соответствует значениям коэффициента земной рефракции  $K=0,054—0,165$ . Коэффициент земной рефракции определен по формуле

$$K = \frac{2R\gamma}{L\rho''},$$

где  $R$  — радиус Земли;  $\gamma$  — угол рефракции, угл. с;  $L$  — расстояние от источника до приемника:  $\rho''=206265''$  — угол в 1 рад., выраженный в угловых секундах. По измерениям [9], выполненным над морской поверхностью в летний период в дневное время (с 6 ч 00 мин до 2 ч 00 мин) при средней высоте луча 11,2 м, для коэффициента земной рефракции получены значения в пределах 0,013—0,189, что близко к значениям, полученным нами. Однако в работе [1] по результатам кругло-суточных измерений в летний период при средней высоте луча над морской поверхностью, равной 31 м, для коэффициента земной рефракции получены значения в интервале от 0,646 до 0,830, что в несколько раз больше значений, полученных в наших измерениях и в работе [9]. Сравнение результатов, приведенных в настоящей работе и в работах [1, 9], показывает, что имеются также существенные различия во времени наступления значений углов вертикальной рефракции, близких к максимальным и минимальным значениям. Если в наших измерениях большие значения углов рефракции наблюдались с 18 ч 00 мин до 1 ч 00 мин (рис. 2), то в работе [9] на трассах высотой примерно 10 м большие значения углов рефракции наблюдались с 15 ч 00 мин до 18 ч 00 мин. В работе [1] большие

значения углов рефракции наблюдались дважды в течение суток — с 5 час 00 мин до 10 ч 00 мин и с 19 ч 00 мин до 22 ч 00 мин, тогда как по нашим измерениям [9] период с 6 ч 00 мин до 10 ч 00 мин был временем минимальных значений угла рефракции. Проведенное выше сравнение результатов измерений еще раз указывает на существенную зависимость характера суточных изменений коэффициента земной рефракции от микроклиматических условий места проведения измерений и метеорологического режима в период их выполнения.

**Список литературы:** 1. *Алексеев А. В.* Исследование вертикальной рефракции над морской поверхностью. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1976, вып. 24. 2. *Казаков Л. Я., Ломакин А. Н.* Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. — В сб.: Распространение радиоволн, М., Наука, 1975. 3. *Казанский К. В.* Земная рефракция над обширными водными поверхностями. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 4. *Малковский О. Н.* О влиянии вертикальной рефракции на распространение лучей газовых лазеров. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, вып. 4. 5. Метеорологический режим озера Саван/ Под. ред. М. П. Тимофеева. Л., Гидрометеиздат, 1960. 6. *Михайлов В. С., Лазанов П. Е.* Об инструментальном учете влияния атмосферной рефракции на результаты геодезических измерений. — Геодезия и картография, 1975, № 1. 7. *Прилепин М. Т.* Теория одноволнового метода определения геодезической рефракции. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1973, № 3. 8. *Ролль Г. У.* Физика атмосферных процессов над морем. Л., Гидрометеиздат, 1968. 9. *Тлустяк Б. Т.* Исследование закономерностей изменения коэффициента земной рефракции в прибрежной зоне больших водных поверхностей. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1974, вып. 20. 10. *Хаимов З. С.* Исследование рефракции луча лазера. — Геодезия и картография, 1968, № 2.

Работа поступила 14 февраля 1978 года.  
Рекомендована институтом физических исследований АН АрмССР.