

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В.Лукин, д.т.н., Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева, СО РАН, Томск, lukin@iao.ru

Описан дифференциальный измеритель средней по трассе распространения излучения структурной постоянной показателя преломления атмосферы, созданный коллективом ученых: Л.Антошкиным, Н.Ботыгиной, О.Емалеевым, П.Коняевым и А.Петровым под руководством автора. Прибор прошел испытания в реальной атмосфере. Приведены результаты модельного численного эксперимента по измерению поперечной к трассе горизонтальной компоненты средней скорости ветра.

Прибор предназначен для измерения астроклиматических характеристик атмосферы и оперативного контроля текущих значений параметра турбулентности атмосферы для оценки влияния турбулентности на работу различных оптических устройств. Физические основы оптических методов, применяемых в приборах измерения параметров атмосферной турбулентности, достаточно подробно изложены в работе [1]. Использование дифференциального метода в приборе, измеряющем параметры турбулентности по дрожанию изображения, вызванному атмосферной турбулентностью, позволяет уменьшить погрешность измерений, связанную с вибрацией конструкций прибора. В работе [2] приведены обоснования дифференциального метода и получены формулы для определения структурной постоянной показателя преломления из измерений дрожания изображения источника плоской волны, а также результаты испытания дифференциального измерителя, работающего по "звезде".

Для измерения астроклиматических характеристик атмосферы при выборе места установки оптических инструментов, предназначенных для наблюдений в атмосфере, необходимы

компактные малогабаритные многофункциональные дифференциальные измерители, работающие в полевых условиях. В составе таких трассовых измерителей должны быть легко переносимые источники излучения. Именно такой вариант дифференциального измерителя рассматривается в данной работе.

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ДИТ
Дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ) состоит из источника лазерного излучения, который устанавливается в начале атмосферной трассы, и приемного устройства на конце трассы. Источник выполнен в виде автономного прибора (рис.1). Излучателем сферической волны служит малогабаритный лазерный модуль KLM-D532-5-5, питающийся от аккумулятора. Для удобства транспортировки штатив, на котором установлен излучатель, выполнен в виде разъемной конструкции. Основанием штатива служат три опоры с регулировочными винтами.

Приемное устройство измерителя ДИТ создано на базе серийного зеркально-линзового телескопа ТАЛ-200К. Перед объективом телескопа симметрично относительно центра установленная маска с четырьмя входными субапертурами, в которых ус-

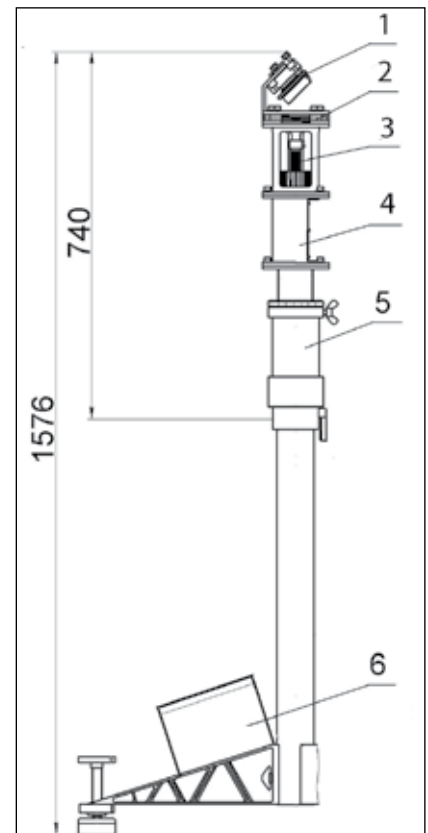


Рис.1. Конструкция источника ДИТ: 1 – головка поворотного зеркала; 2 – кассеты светофильтров; 3 – лазерный модуль KLM-D532-5-5 с радиатором; 4 – электронный блок (преобразование напряжения аккумулятора в напряжение питания лазера, управление мощностью лазерного излучения, контроль напряжения аккумулятора), 5 – несущая колонна, 6 – аккумулятор

тановлены оптические клинья. Дополнительная оптическая система переносит дифракционные изображения лазерного источника из плоскости изображения объектива телескопа в плоскость фотоматрицы видеокамеры. Цифровая видеокамера Prosilica GE680 регистрирует распределение освещенности в плоскости изображения.

Оперативные вычисления параметра атмосферной турбулентности производят на основе измерения угловых смещений центров тяжести (ЦТ) каждого изображения и вычисления дисперсии разности угловых смещений ЦТ двух изображений, которые сформированы вертикальной парой входных субапертур. Определение параметра атмосферной турбулентности именно из дисперсии разностного сигнала позволяет исключить влияние инструментальных дрожаний изображения. Функциональная схема ДИТ приведена на рис.2. Излучение

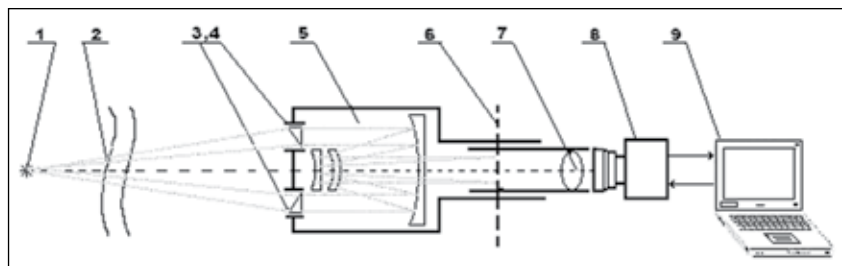


Рис.2. Функциональная схема дифференциального измерителя: 1 – источник лазерного излучения, 2 – атмосферная трасса, 3, 4 – входные субапертуры с оптическими клиньями, 5 – оптическая труба телескопа ТАЛ-200К, 6 – плоскость наименьшего изображения, 7 – оптическая система (переносит изображение в плоскость фотоматрицы видеокамеры), 8 – видеокамера Prosilica GE680, 9 – ноутбук

лазерного источника 1 при распространении в турбулентной среде 2 подвергается случайным искажениям. Это приводит к случайным деформациям волнового фронта излучения, падающего на входные субапертуры. Наклоны волновых фронтов на входных субапертурах приводят к угловым смещениям центров тяжести дифракционных изображений источника в плоскости наименьшего изо-

бражения 6 объектива телескопа. Аберрации волнового фронта вызывают перераспределение освещенности в дифракционном изображении. Набор сменных диафрагм, входящих в состав прибора, позволяет подобрать необходимый диаметр входных субапертур для получения изображения источника, близкого к дифракционному.

Разнос изображений на необходимое расстояние в пло-

скости наименьшего изображения осуществляется клиньями 3, 4. Необходимое расположение дифракционных изображений в плоскости фотоматрицы устанавливается вращением клиньев. Оптическая система переноса изображений 7 обеспечивает требуемый угловой масштаб пиксела (элемента ПЗС-матрицы видеокамеры 8) при регистрации дрожания изображений. Видеокамера 8 преобразует оптические изображения в электрические цифровые сигналы, пропорциональные освещенности этих изображений. Они по Ethernet-кабелю поступают в компьютер (ноутбук) 9, где происходит визуализация и анализ изображений, вычисление и запись в файлы значений параметров турбулентности.

Положение изображения в плоскости регистрации определяется положением центра тяжести изображения. От точности определения мгновенных координат центра тяжести каждого из двух смешиваемых изображений зависит точность вычисления дисперсии разности координат двух изображений (полученных от двух субапертур) и, следовательно, точность определения параметров турбулентности. Присутствие шумов измерителя приводит к ошибке определения координат центра тяжести изображения. Ошибка измерений увеличивается с увеличени-

ем окна анализа. Для уменьшения влияния шумовой составляющей при вычислении координат центра тяжести изображения в измерителе используют алгоритм «следающего окна». Суть алгоритма заключается в следующем: находят координаты максимума освещенности изображения, эти координаты задают положение окна анализа (являются центром окна анализа). Затем рассчитывают координаты центра тяжести изображения в окне анализа. При смещении изображения окно анализа перемещается вслед за изображением.

Координаты центра следающего окна анализа определяются в системе координат, связанной с ПЗС-матрицей. Координаты центра тяжести изображения, рассчитанные в окне анализа, также приводятся к той же системе координат. Размер следающего окна анализа должен быть равным диаметру диска Эйри. Во-первых, это позволяет уменьшить шумовую ошибку при определении координат центра тяжести изображения. Дело в том, что сигнал, идущий от слабо освещенных элементов ПЗС-матрицы, содержит большую долю шумовой составляющей. А обрезание изображения исключает ее влияние. Во-вторых, надо понимать, что при вычислении координат ЦТ изображения в окне, ограниченном размером диска Эйри, не учитывается перераспределение освещеннос-

ти в дифракционных кольцах за счет aberrаций волнового фронта на входных субапертурах. То есть перераспределение освещенности в изображении, а следовательно смещение ЦТ, вызвано в основном средними наклонами волнового фронта на входной субапертуре. Таким образом, в соответствие с измеряемыми величинами приводят формулы для расчета параметров турбулентности.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИТ

Основной метрологической характеристикой дифференциального измерителя турбулентности является угловой масштаб элемента ПЗС-матрицы видеокамеры, с помощью которой регистрируются угловые смещения изображений. Угловой масштаб пиксела входит параметром в формулу [3], по которой рассчитывается среднее по трассе распространения излучения значение структурной постоянной показателя преломления.

Угловой масштаб пиксела определялся экспериментально в процессе калибровки прибора. В оптике традиционно для определения цены делений окулярных шкал и сеток используется объект-микрометр. При калибровке ДИТ объект-микрометр ОМ-П помещался в плоскость наименьшего изображения. Находилась соответствие между длиной ка-

Таблица 1. Основные технические характеристики ДИТ

Диапазон измеряемых значений C_n^2 , м ^{-2/3}	$3,70 \cdot 10^{-16} - 3,50 \cdot 10^{-13}$	Рабочий диапазон ДИТ, число уровней**	40–255
Относительная погрешность, приведенная к минимальному измеряемому значению C_n^2 , % *	35	Частота кадров в режиме «ИЗМЕРЕНИЕ», Гц	100
Длина трассы, м	200, 100	Частота обновления текущих значений C_n^2 , Гц	1
Диаметр субапертур, мм	30, 20, 14, 10	Параметры лазерного излучателя	
Разнос субапертур, мм	154	Длина волны лазерного излучения, нм	532
Фокусное расстояние объектива телескопа ТАЛ-200К, мм	200040	Расходимость лазерного излучения, мрад	3
		Максимальная мощность лазерного излучения, мВт	4,5
Угловой масштаб пиксела фотоматрицы, мкрад/пиксел	$0,880 \pm 0,050$	Начальный диаметр пучка излучения, мм	5
Размер элемента ПЗС-матрицы видеокамеры, мкм	7,4×7,4	Время непрерывной работы от аккумулятора, ч	более 70
Разрешение видеокамеры, пиксел	640 × 480		
Примечание. * Определяется при относительной погрешности измерения длины трассы $E_L = 4 \%$; ** определяется по сигналу, соответствующему максимуму освещенности дифракционного изображения			

либровочного отрезка объект-микрометра и количеством элементов разрешения матрицы, соответствующим этому отрезку в плоскости регистрации. При калибровке использовали различные участки шкалы объект-микрометра и измерения многократно повторяли.

Диапазон измеряемых значений структурной постоянной показателя преломления рассчитывали на основе выводов теории распространения волн в атмосфере. В расчетах использовали измеренное значение шумовой составляющей дисперсии регистрируемых угловых смещений ЦТ изображения, угловой масштаб пиксела, размер поля зрения, размер следящего окна, длину трассы (200 м при определении нижней границы и 100 м при определении верхней границы диапазона). Нижняя граница диапазона измеряемых значений уровня турбулентности зависит от шумов системы регистрации изображения, которые сказываются при вычислении положения центра тяжести изображения. Пороговое угловое смещение ЦТ изображения определялось из условия, что в оценке дисперсии регистрируемых угловых смещений ЦТ каждого изображения дисперсия смещений за счет турбулентности в четыре раза превышает дисперсию шумовой составляющей. В дисперсии разности угловых смещений ЦТ двух регистрируемых изображений шумовая составляющая удваивается, так как шумы не коррелированы между собой.

Дисперсия шумовой составляющей смещения ЦТ измерялась экспериментально при испытании прибора на лабораторном стенде. В плоскости наименьшего изображения создавали неподвижное изображение. Его размеры соответствовали минимальной входной субапертуре ДИТ, а освещенность в максимуме соответствовала нижней границе рабочего диапазона ДИТ. Измеряли координаты ЦТ изображения и делали оценку дисперсии смещения ЦТ изображения за счет шумов прибора. Значения времени экспозиции кадра, частоты выборки и длительности реализации соответствовали значениям этих параметров в рабочем режиме ДИТ. При таких условиях эксперимента измеренная шумовая составляющая соответствует максимальной шумовой ошибке, возникающей при эксплуатации ДИТ. Верхняя граница измеряемых значений турбулентности определяет-

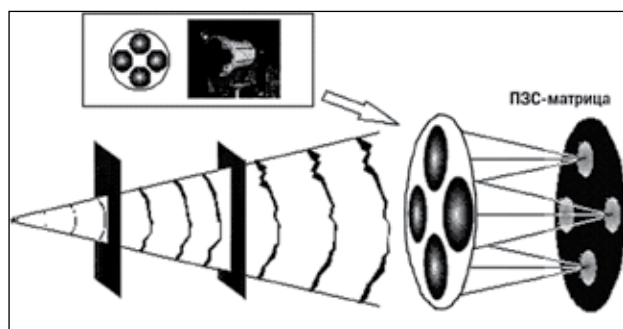


Рис.3. Схема вычислительного эксперимента

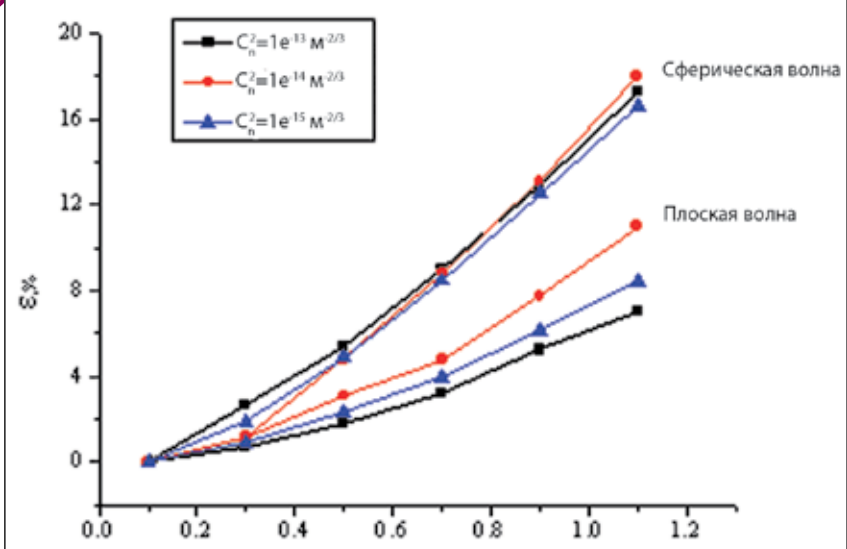


Рис.4. Зависимость погрешности C_n^2 от величины внутреннего масштаба

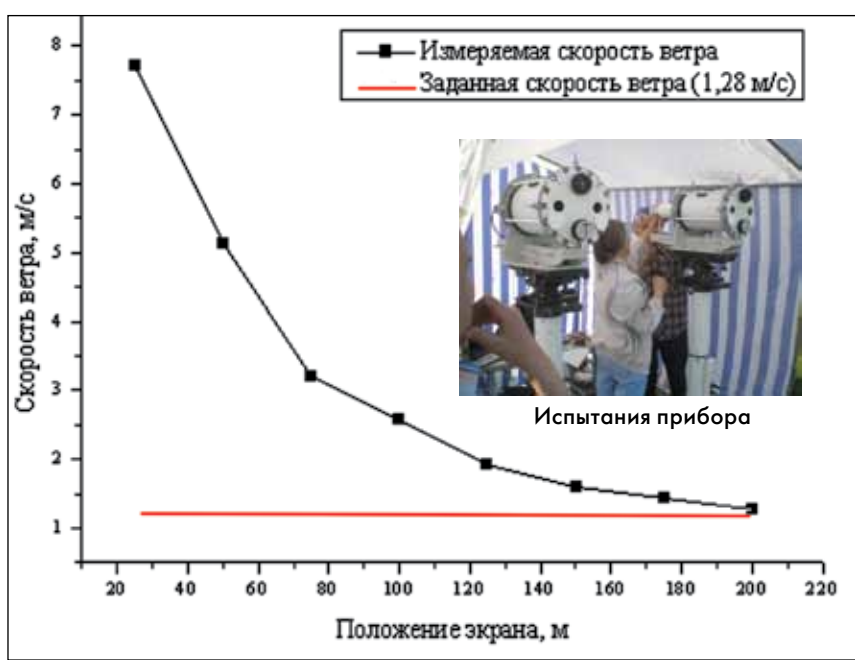


Рис.5. Зависимость погрешности измерения скорости от положения турбулентного слоя (расстояние указано относительно передатчика)

ся полем зрения ДИТ: размерами двух не перекрывающихся областей ПЗС-матрицы, отведенных для регистрации смещений каждого из двух изо-

бражений, сформированных телескопом с двумя входными субапертурами. Основные технические характеристики ДИТ приведены в табл.1.

Таблица 2. Результаты измерений структурной постоянной показателя преломления

Дата	Время	$C_n^2, \text{ м}^{-2/3}$	
		ДИТ	Метеостанция
15.08.2008	16:48	$6,064 \cdot 10^{-14}$	$1,978 \cdot 10^{-14}$
15.08.2008	17:31	$1,158 \cdot 10^{-14}$	$0,899 \cdot 10^{-14}$
15.08.2008	17:44	$1,169 \cdot 10^{-14}$	$0,693 \cdot 10^{-14}$
25.08.2008	17:10	$2,640 \cdot 10^{-14}$	$2,387 \cdot 10^{-14}$
25.08.2008	17:16	$0,959 \cdot 10^{-14}$	$0,931 \cdot 10^{-14}$

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИТ

Было проведено численное моделирование распространения когерентного пучка на приземной трассе в условиях, близких к экспериментальным (рис.3). Для того чтобы оценить влияние различных параметров эксперимента (величина внутреннего масштаба турбулентности, неоднородность скорости ветра вдоль трассы и т. д.) на точность измерения C_n^2 и поперечной в трассе горизонтальной компоненты средней скорости ветра, вычисления проводились с использованием скалярного волнового уравнения в параболическом приближении методом расщепления. В процедуре вычислений использован алгоритм быстрого преобразования Фурье на основе разработанного П.Коняевым модифицированного алгоритма расщепления [4] и численной модели динамической «замороженной» турбулентности. Модель описывает условия, когда свойства турбулентности со временем не меняются: имеет место только перенос неоднородностей среды ветром.

Исходную волну от источника излучения принимали в виде либо расходящегося, либо коллимированного гауссова пучка. Изменения показателя преломления вдоль трассы распространения, вызванные атмосферной турбулентностью, задавали в виде модели «фазовых экранов». В вычислительном эксперименте использованы следующие значения параметров: длина трассы $L = 200$ м, диаметр входных субапертур $D = 30$ мм, расстояние между центрами входных субапертур $d = 154$ мм, эффективный радиус излучателя $a_0 = 0,05$ м, длина волны $\lambda = 0,532$ мкм, внешний масштаб турбулентности $L_0 = 1$ м, внутренний масштаб турбулентности $l_0 = 0,1-1,1$ см. Из полученных данных (рис.4) видно, что возможная погрешность измерения C_n^2 во всем диапазоне изменения значения внутреннего масштаба турбулентности l_0 не превышает 20 %.

Для измерения поперечной к трассе горизонтальной компоненты средней скорости ветра использована корреляцион-

ная методика. Согласно ей, время горизонтального смещения турбулентных неоднородностей от одной субапертуры к другой оценивали по величине смещения максимума взаимной корреляционной функции флуктуаций энергетических центров фокальных пятен субапертур. При использовании в качестве измерителя расходящейся сферической волны расположенный вдоль трассы турбулентный слой влияет на измеряемое значение поперечной скорости ветра. Оценка возможной погрешности измерений была проведена для случая одного турбулентного экрана при варьировании его положения относительно передатчика и приемника (рис.5). Данные на рис.5 приведены без коррекции угловой расходимости сферической волны. Поэтому в начале трассы ошибка измерения велика, но по мере смещения турбулентного экрана по трассе в сторону приемника она снижается.

ИСПЫТАНИЯ ДИТ НА АТМОСФЕРНОЙ ТРАССЕ

Испытания по проверке работоспособности ДИТ проводились в августе 2008 года на базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы

им. В.Е.Зуева СО РАН. Измерения среднего по трассе распространения значения структурной постоянной показателя преломления проводились на трассах протяженностью 100 м (15 августа) и 200 м (25 августа). Испытания проводились при следующих метеорологических условиях: температура воздуха 22–23 °С (15 августа) и 15–16 °С (25 августа); скорость ветра 1–2,5 м/с; направление ветра – поперек трассы.

Для сопоставления результатов одновременно с измерениями уровня турбулентности дифференциальным измерителем проводили также измерения с помощью мобильной ультразвуковой метеостанции «Метео-3М» [5], расположенной вблизи приемного устройства дифференциального измерителя. Видно, что результаты измерений (табл.2) структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы оптическим методом, реализованным в ДИТ, достаточно хорошо согласуются с акустическими измерениями ультразвуковой метеостанцией.

Настоящие исследования выполнялись при частичной поддержке программы научных исследований СО РАН, выпол-

няемых совместно с организациями национальных академий наук стран СНГ «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гурвич А., Кон А., Миронов В.** Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. – М: Наука, 1976.
2. **Sarazin M., Roddier F.** The E.S.O. Differential Image Motion Monitor. – Astron. and Astrophys, 1990, № 227.
3. **Антошкин Л., Ботыгина Н., Емалеев О. и др.** Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности. – Оптика атмосферы и океана, 1998, т. 11, № 11.
4. **Коняев П.** Модификация метода расщепления для численного решения квазиоптических задач. – Томск: VI Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Тез. докл., 1981.
5. **Азбукин А., Богушевич А., Ильичевский В. и др.** Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03. – Метеорология и гидрология, 2006, № 11.
6. **Миронов В., Носов В., Чен Б.** Корреляция смещений оптических изображений лазерных источников в турбулентной атмосфере. – Изв. Вузов. Радиофизика, 1981, т. 24, № 12.



КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

В Томском государственном университете (ТГУ) 22–27 ноября 2010 года пройдет молодежная школа-конференция с международным участием, посвященная 50-летию создания первого в мире лазера. ТГУ – старейший Сибирский университет – основан в 1878 году, он внес солидный вклад в мировую науку, его фундамент составляют прославленные научные школы, и в их числе – «Взаимодействие оптического излучения с веществом». В 2010 году ТГУ присвоен статус «Национальный исследовательский университет».

Конференцию «Лазеры и лазерные технологии» организуют: ТГУ, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН), ООО «ЛИТТ», ОСП «СФТИ ТГУ им. В.Д.Кузнецова», МНОЦ «Ла-

зеры и лазерные технологии», сибирские научные и учебные институты, среди которых Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН (ИОА СОРАН). А информационную поддержку оказывают Лазерная ассоциация и журнал «Известия вузов. Физика».

Научные направления: лазеры и лазерная физика; лазерные технологии; нелинейные кристаллы и преобразование излучения.

Возглавляют Программный оргкомитет ректор ТГУ профессор Г.Майер и президент Болгарской академии наук академик Н.Саботинов, их заместителем является профессор ТГУ А.Солдатов, генеральный директор ООО «ЛИТТ». От Лазер-

ной ассоциации вошел ее председатель профессор И.Ковш, китайский Институт оптоэлектроники представляет Жао Янг Пенг, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы – С.Ануфрик, ТУСУР – С.Шандаров, ИОА СОРАН – О.Романовский. Еще от ТГУ в комитет вошли Г.Дунаевский, Г.Евтушенко, В.Черепанов, Н.Юдин, от ОСП «СФТИ ТГУ им. В.Д.Кузнецова» – Т.Копылова, от ИСЭ СО РАН – В.Тарасенко. СГУ представляет И.Плюсин, руководитель Лазерного Центра СурГУ.

Оргкомитет школы-конференции «Лазеры и лазерные технологии»: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 52-94-98, факс (3822) 52-98-23 Оргкомитет,

<http://www.tsu.ru/>