УДК 681.78:621.373.826

# ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЭЛЕЕВСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОПОРНОЙ ЗВЕЗДЫ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА ЦЕЙСС-2000 ОБСЕРВАТОРИИ ПИК ТЕРСКОЛ

© 2025 А. В. Ларичев<sup>1</sup>, Е. А. Копылов<sup>2\*</sup>, А. С. Гончаров<sup>1</sup>, Л. А. Больбасова<sup>2,3</sup>, В. П. Лукин<sup>3</sup>, Н. Г. Ирошников<sup>1</sup>, М. Е. Сачков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия <sup>2</sup> Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

<sup>3</sup>Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055 Россия

Поступила в редакцию 15 декабря 2024 года; после доработки 26 февраля 2025 года; принята к публикации 17 марта 2025 года

В настоящей работе описаны конструктивные и технические особенности системы рэлеевской лазерной опорной звезды (ЛОЗ) как опорного источника адаптивной оптической системы (АОС), предназначенной для использования на телескопе Цейсс-2000 астрономической обсерватории Пик Терскол (координаты 43°27631 с. ш., 42°49939 в. д.), расположенной на высоте 3150 м над уровнем моря. Проведено экспериментальное тестирование системы рэлеевской ЛОЗ на телескопе Цейсс-2000. Представленные численные оценки корреляционного радиуса *г*<sub>0</sub> показывают, что в перспективе использование АОС с рэлеевской ЛОЗ на данном телескопе позволит улучшить качество формируемого изображения на порядок.

Ключевые слова: атмосферные эффекты — приборы: адаптивная оптика — методы: лазерные опорные звезды

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой, ограничивающей возможности наземных астрономических наблюдений, является атмосфера, где случайные неоднородности показателя преломления, возникающие при турбулентном движении, вызывают размытие, дрожание, мерцание оптического изображения и, как следствие, обуславливают существенное снижение разрешающей силы, приводя к потерям в проницающей способности оптического телескопа. Для устранения этого влияния телескопы оснащаются системой адаптивной оптики (АО), предназначенной для достижения качества изображения, формируемого наземным телескопом, близким к дифракционному в реальном масштабе времени за счет коррекции турбулентных искажений волнового фронта оптического излучения. Но для работы такой системы необходим источник опорной волны, находящийся в изопланарной с наблюдаемым объектом области, поэтому наличие естественного источника для АОС требуемой яркости часто невозможно при астрономических наблюдениях. В результате наиболее перспективным является создание искусственного опорного источника на

основе обратного рассеяния лазерного излучения в атмосфере, получившего название «лазерная опорная звезда» (ЛОЗ) (Tokovinin, 2025).

Существует два подхода к созданию ЛОЗ это использование флуоресценции атомов натрия мезосферы и рэлеевского рассеяния на высотах 5-25 км. Безусловно, применение натриевых ЛОЗ является более эффективным в плане качества коррекции, но обеспечение достаточной яркости такой ЛОЗ для уверенной работы датчика волнового фронта (ДВФ) системы АО требует высокомощных лазерных источников на длине волны 589 нм, являющихся уникальными, громоздкими и дорогостоящими. Кроме того, интенсивность сигнала ограничена концентрацией атомов натрия в мезосфере. Напротив, для создания рэлеевской ЛОЗ подходят коммерчески доступные лазеры с высокой мощностью и качеством пучка. Наряду с этим обратное рэлеевское рассеяние в слоях атмосферы создает высокий поток фотонов, то есть яркий опорный источник, что является преимуществом по сравнению с натриевыми ЛОЗ. В отличие от натриевых ЛОЗ, рэлеевские не слишком чувствительны к изменениям содержания частиц или изменениям расстояния до слоев обратного рассеивания. При этом высоту регистрации рассе-

<sup>\*</sup>E-mail: kopylov@inasan.ru

Телескоп,	Диаметр апертуры	Длина	Мощность,	Число	Ссылка
место расположения	телескопа, м	волны, нм	Вт	ЛОЗ	Cedima
SOAR, Cerro Pachon	4.1	355	10	1	[1]
WHT, La Palma	4.2	532	20	4	[2]
LBT, Mt. Graham, Arizona	$2 \times 8.4$	532	18	3	[3]
MMT, Mt. Hopkins, Arizona	6.5	532	25	5	[4]
Kitt Peak, Arizona	2.1	355	15	1	[5]
UH telescope, Mauna Kea	2.2	355	16	1	[6]

Таблица 1. Системы рэлеевских ЛОЗ астрономических телескопов

[1] — Southern Astrophysical Research Telescope (Tokovinin et al., 2016); [2] — William Herschel Telescope, (Morris, 2005); [3] — Large Binocular Telescope (Rabien et al., 2019); [4] — Multiple Mirror Telescope (Bendek et al., 2011); [5] — Jensen-Clem et al. (2018); [6] — University of Hawaii telescope (Baranec et al., 2024).

яния можно выбирать. Это делает рэлеевские ЛОЗ востребованными как в РФ (Bogachev et al., 2021), так и за рубежом на крупных астрономических телескопах, где внедряются системы АО следующего поколения, получившие название АО приземного слоя (в оригинале Ground-Layer Adaptive Optics — GLAO), в которых используется несколько (3–5) рэлеевских ЛОЗ (Bendek et al., 2011; Morris, 2005; Rabien et al., 2019).

В таблице 1 суммируются данные о системах рэлеевских ЛОЗ зарубежных астрономических обсерваторий. В настоящее время на телескопах средних размеров, с апертурой 2–2.5 м, активно разрабатывается применение одиночных рэлеевских ЛОЗ (Baranec et al., 2024; Jensen-Clem et al., 2018), к примеру, такая система работает на 4.1-м телескопе SOAR (Tokovinin et al., 2016).

Можно выделить три категории вопросов, связанных с техникой ЛОЗ:

- проблемы формирования опорного источника в атмосфере, выбор оптимальной апертуры формирующего ЛОЗ телескопа и другие требования к лазерному излучателю, выбор схемы работы (моностатическая или бистатическая);
- ошибки измерений, возникающие при детектировании сигнала от ЛОЗ с помощью ДВФ;
- алгоритмы использования данных от ЛОЗ для коррекции турбулентных искажений.

Отметим, что система ЛОЗ, как и другие элементы АО, создается под конкретные атмосферные условия места расположения телескопа, при этом вышеуказанные аспекты во многом связаны с атмосферными условиями места расположения телескопа и, в частности, с уровнем турбулентности атмосферы, а также величиной средней скорости эффективного ветра.

Обсерватория Пик Терскол (координаты 43°27631 с. ш., 42°49939 в. д.), самая высокогорная астрономическая обсерватория на территории РФ, находится в Кавказских горах на высоте 3150 м над уровнем моря. Главный ее инструмент телескоп Цейсс-2000 с размером апертуры 2 м, схемы Ричи-Кретьена с фокусным расстоянием, равным 16 м. Высота башни телескопа составляет 47 м. Телескоп оснащен скоростным фотометром с набором прецизионных фильтров, навесным многомодовым спектрометром в фокусе Кассергена, матричным эшелле-спектрографом высокого и сверхвысокого разрешения в фокусе Кудэ и спектрографом высокого разрешения. В настоящее время ведутся работы по оснащению телескопа системой AO (Kopylov et al., 2024).

Цель работы — создание системы лазерной опорной звезды как опорного источника АОС телескопа Цейсс-2000 обсерватории Пик Терскол.

#### 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ

В работе Shikhovtsev et al. (2024) приведены результаты измерения характеристик атмосферной турбулентности в месте расположения телескопа. Было установлено, что типичные значения радиуса пространственной корреляции фазы (параметр Фрида)  $r_0$  лежат в диапазоне 7–12 см, кроме того, были измерены высотные профили структурной функции атмосферной турбулентности  $C_n^2$ . Заметим, что, зная высотный профиль  $C_n^2$ , можно вычислить значение  $r_0$ , интегрируя данные по трассе распространения излучения (Bolbasova and Lukin,



**Рис. 1.** Параметр Фрида в зависимости от высоты формирования ЛОЗ при полной компенсации атмосферных искажений.

2012):

$$r_0 = \left[0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \int C_n^2(z) dz\right]^{-3/5}.$$
 (1)

Очевидно, что если ЛОЗ расположена в толще атмосферы, то данные о фазовых флуктуация могут быть получены только от слоев атмосферы. лежащих ниже ее высоты. Соответственно, только искажения, создаваемые этими слоями, могут быть скомпенсированы посредством АОС, работающей по такому источнику. На рис. 1 представлены расчетные данные, сделанные на основе измерений работы Shikhovtsev et al. (2024), иллюстрирующие увеличение параметра  $\Phi$ рида  $r_0$  при полной компенсации (то есть считается, что АОС является идеальной, не обладает фокальным анизопланатизмом (Wilson and Jenkins, 1996), измеряет и компенсирует измеренные искажения без временной задержки) турбулентных искажений для различной высоты формирования ЛОЗ.

Видно, что компенсированная величина  $r_0$  приближается к размеру апертуры телескопа при высоте формирования ЛОЗ 16 км. Обращает на себя внимание и практически плоский участок кривой для высот 1—6 км, где  $r_0 \approx 30$  см. Появление такого участка связано со значительным спадом величины  $C_n^2$  в диапазоне высот от 500 м до 6 км. При учете явления фокального анизопланатизма данный участок будет приобретать некоторый наклон в области малых высот. При расположении ЛОЗ на высотах более 3 км фокальный изопланатизм вносит незначительный вклад, кроме того, известны методы его устранения при проведении измерений (Bendek et al., 2011). Таким образом, при полной компенсации искажений посредством АОС можно рассчитывать на увеличение разрешения телескопа в 3–3.5 раза (измеренные Shikhovtsev et al. (2024) средние значения  $r_0$  для летнего времени лежат в диапазоне 8.3–10 см).

#### 3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЛОЗ

Рассмотрим основные факторы, влияющие на точность измерения волнового фронта при использовании ЛОЗ. Если абстрагироваться от конкретной реализации датчика волнового фронта (ДВФ), то точность измерения ограничивается доступным потоком фотонов и геометрией формирования.

Особенности конструкции телескопа Цейсс-2000 не позволяют без существенной его модернизации использовать моностатическую схему формирования ЛОЗ. Практичным решением является размещение проектора ЛОЗ на боковой поверхности трубы телескопа, где имеются соответствующие крепежные элементы. Данная бистатическая схема формирования показана на рис. 2.

При таком размещении расстояние от оптической оси телескопа до оси проектора ЛОЗ b = 1.55 м. В случае формирования ЛОЗ рэлеевского типа рассеянное излучение собирается с подсвеченного столба величиной  $\Delta h$ , лежащего на высоте *h*. Вследствие использования такого источника в датчике Шака-Гартмана фокальные пятна в субапертурах уже не будут иметь форму диска Эйри, а будут представлять собой вытянутые фигуры (Tyson, 2011). Причем величина и направление удлинения для каждой субапертуры будут различны, так как из центров субапертур датчика ЛОЗ будет видна под разными углами. Наибольшее удлинение будет для субапертур, лежащих на наибольшем расстоянии от оси проектора. Исходя из геометрии схемы, нетрудно посчитать, что максимальное удлинение delong фокальных пятен составит

$$d_{\text{elong}} = k_{\text{tel}} \beta f_{\text{ml}} \\ = \frac{D f_{\text{ml}}}{a} \left( b + \frac{D}{2} \right) \left( \frac{1}{h} - \frac{1}{h + \Delta h} \right), \quad (2)$$

где  $k_{\text{tel}} = D/a$  — коэффициент увеличения телескопа. Оценим по этой формуле удлинение пятен для разных h и  $\Delta h$ , возникающее при использовании датчика Шака–Гартмана с размером апертуры a = 6 мм, субапертуры  $a_{\text{sub}} = 0.3$  мм и фокусным расстоянием микролинз  $f_{\text{ml}} = 5$  мм (рис. 3).

Отметим, что для оптимальной работы датчика фокальные пятна не должны выходить за границы субапертуры, а значит, их длина не должна



**Рис.** 2. Схема прохождения излучения от ЛОЗ в бистатической схеме.

превышать ориентировочно  $a_{sub}/2$  для сохранения разумного диапазона измерения локальных наклонов. Эта величина нанесена на график в виде пунктирной линии. Нижней линией обозначен диаметр дифракционно ограниченного фокального пятна микролинзы датчика,  $d_{airy} = 21.6$  мкм.

На форму фокального пятна влияет не только протяженность  $\Delta h$ , но и диаметр пучка ЛОЗ w, который на высоте фокусировки лазера  $h + \Delta h/2$  составляет

$$w_{h+\Delta h/2} = \delta \frac{\lambda M^2}{D_{\text{proj}}} \left( h + \frac{\Delta h}{2} \right), \qquad (3)$$

где  $D_{\rm proj}$  — апертура телескопа лазера, формирующего ЛОЗ,  $M^2$  — параметр качества пучка<sup>1</sup>,  $\delta$  — коэффициент, зависящий от распределения

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 80 № 2 2025

интенсивности в сечении пучка, лежащий в диапазоне  $\delta > 4/\pi$ . Диаметр верхнего и нижнего сечений пучка ЛОЗ будет больше, так как они отстоят от точки фокусировки лазера.

Фокальное пятно является изображением ЛОЗ, а потому будет иметь вид, показанный на рис. 4.

Центральная часть пятна будет иметь ширину

$$d_{h+\Delta h/2} = d_{\text{airy}} + \frac{w_{h+\Delta h/2}}{h+\Delta h/2} k_{\text{tel}} f_{\text{ml}}$$
  
=  $\lambda f_{\text{ml}} \left( 2.44 \frac{1}{a_{\text{sub}}} + \delta \frac{M^2 k_{\text{tel}}}{D_{\text{proj}}} \right).$  (4)

При  $D_{\rm proj} = 120$  мм,  $M^2 = 1.4$  и  $\delta = 2.6$  значение  $d_{h+\Delta h/2}$  составит 48.5 мкм. Эта величина также отмечена пунктирной линией на рис. 3.

Уширение фокального пятна на краях в дальнейших расчетах не учитывается, так как в нашем случае оно несущественное. Например, для h = 4 км и  $\Delta h = 1$  км оно не превышает 3 мкм.

Анализ данных на рис. З позволяет для заданного уровня атмосферной турбулентности выбрать максимально допустимую протяженность ЛОЗ, при которой не наблюдается превышение допустимого диапазона измерений датчика по амплитуде. Чтобы оценить количество фотонов, формирующих фокальное пятно, используем лидарное уравнение (Wandinger, 2005) и определим количество световой энергии, собираемое субапертурой датчика:

$$U_{\rm sub} = \frac{P_0}{N_{\rm frame}} \frac{\beta(\lambda)}{4\pi} (k_{\rm tel} a_{\rm sub})^2 Q_e T_0 T_A^2 \\ \times \int_h^{h+\Delta h} \frac{\exp(-(z+h_0)/H_s)}{z^2} dz,$$
(5)

где  $P_0$  — мощность лазера, формирующего ЛОЗ,  $\beta(\lambda)$  — объемный коэффициент обратного рэлеевского рассеяния,  $H_s$  — высота, на которой давление падает в e раз,  $h_0$  — высота расположения телескопа над уровнем моря,  $Q_e$  — квантовая эффективность фотоприемника,  $N_{\rm frame}$  — кадровая частота работы адаптивной системы,  $(1 - T_0)$  световые потери в оптических элементах системы,  $(1 - T_A)$  — световые потери в атмосфере.

Дальнейшие расчеты были выполнены при следующих параметрах:  $P_0 = 18$  Вт,  $H_s = 8$  км,  $h_0 = 3.1$  км,  $Q_e = 0.5$ ,  $N_{\text{frame}} = 400$  кадр с<sup>-1</sup>,  $T_0 = 0.5$ ,  $T_A = 0.78 \ \beta(532 \text{ мкм}) = 1.426 \times 10^{-2} \text{ км}^{-1}$  Penndorf, 1957). Оптические потери в атмосфере были оценены на основании измерений атмосферной экстинкции по месту расположения телескопа (Neizvestny, 1983).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008, Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 1. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки (Москва, Стандартинформ, 2010), online at https://docs.cntd.ru/ document/1200076797?ysclid=m90yi8bxtb860021250.



Рис. 3. Зависимость максимального удлинения фокальных пятен датчика Шака-Гартмана от пространственной протяженности ЛОЗ и высоты ее формирования.



**Рис. 4.** Форма фокального пятна на ПЗС-матрице датчика Шака-Гартмана.

Отношение  $U_{\rm sub}$  к энергии одного фотона даст нам количество электронов  $N_e$ , которые генерируются фотонами, попадающими в одну субапертуру и формирующими одно фокальное пятно (см. рис. 5).

Поскольку фокальное пятно на ПЗС-матрице датчика имеет разный размер вдоль и поперек направления удлинения, то и угловая ошибка определения его центроида будет разной. Так, в направлении, перпендикулярном удлинению, она составит

$$E_{\perp} = \frac{d_{h+\Delta h/2}}{f_{\rm ml}\sqrt{N_e}} \frac{1}{k_{\rm tel}},\tag{6}$$

а в направлении удлинения —

$$E_{\parallel} = \frac{d_{h+\Delta h/2} + d_{\text{elong}}}{f_{\text{ml}}\sqrt{N_e}} \frac{1}{k_{\text{tel}}}.$$
 (7)

Домножение на  $\frac{1}{k_{\text{tel}}}$  в этих формулах необходимо для получения угловой ошибки на входе телескопа.

На рис. 6 видно, что ошибка увеличивается как при малых  $\Delta h$  (из-за уменьшающегося количества света, попадающего в датчик), так и при больших (из-за удлинения фокальных пятен). Следовательно, для каждой высоты h существует такая  $\Delta h_m$ , при которой ошибка будет минимальной. На рис. 7 изображены зависимости  $\Delta h_m$  (кривая 2) и соответствующей ей ошибки (кривая 1) от h.

#### 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ФОРМИРУЮЩЕГО ЛОЗ

Для систем рэлеевских ЛОЗ лазерный источник должен работать в импульсном режиме, чтобы обеспечить стробирование по дальности. Большая часть света рассеивается на малых высотах, поэтому обратный сигнал должен приниматься в течение промежутка времени экспозиции с заданной задержкой относительно импульса. Для этого перед датчиком устанавливается быстродействующий электрооптический затвор, в данной системе ЛОЗ это ячейка Поккельса. После прохождения лазерного импульса рассеянное излучение с малых и промежуточных высот должно отсекаться высокоскоростной системой затвора, способной открываться в точном интервале времени, когда сигнал поступает с определенной высоты.

Частота работы затвора совпадает с частотой следования импульсов лазера, а время открытия



Рис. 5. Зависимость количества электронов, генерируемых за один кадр в субапертуре датчика Шака-Гартмана, от высоты формирования ЛОЗ.



Рис. 6. Зависимость ошибки определения центроида фокального пятна датчика Шака-Гартмана от пространственной протяженности и высоты формирования ЛОЗ.

выбирается исходя из заданной протяженности ЛОЗ и высоты ее формирования. Время прохождения сигнала от лазера и обратно в датчик зависит от высоты середины объема рассеяния:  $t_s = \frac{2(h + \Delta h/2)}{c}$ . Для рэлеевской ЛОЗ частота импульсов лазера должна быть примерно в десять раз выше частоты Гринвуда, чтобы обеспечить непрерывную коррекцию волнового фронта. Обзор существующих систем рэлеевских ЛОЗ показывает, что обычно эта величина равна 10 кГц

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 80 № 2 2025

(Morris, 2005; Bendek et al., 2011; Tokovinin et al., 2016; Jensen-Clem et al., 2018; Rabien et al., 2019; Вагапес et al., 2024). Для разрабатываемой системы ЛОЗ частота была выбрана более высокой, чтобы обеспечить возможность работы системы в различных астроклиматических условиях обсерватории, а также для потенциального формирования многоточечной ЛОЗ.

На выбор размера  $D_{\text{proj}}$  апертуры формирующего телескопа влияют следующие два фактора. С одной стороны, слишком малый размер



Рис. 7. Зависимость минимальной ошибки определения центроида фокального пятна датчика Шака— Гартмана (кривая 1) и соответствующей протяженности ЛОЗ (кривая 2) от высоты формирования ЛОЗ.

фокусирующей системы приведет к менее резкой фокусировке и увеличению диаметра пучка ЛОЗ,  $w_{h+\Delta h/2}$ , что, в свою очередь, вызовет дополнительное расплывание фокальных пятен датчика Шака-Гартмана. С другой стороны, слишком большой размер также приведет к уширению ЛОЗ за счет турбулентности атмосферы и возникающей дополнительной дефокусировки пучка (Gurvich et al., 1976). Kleimenov et al. (2021) noказали, что увеличение  $D_{\rm proj}$  более  $2r_0$  не дает существенного выигрыша в угловой расходимости пучка. Уменьшение  $D_{\text{proj}}$  менее  $r_0$  также не будет иметь смысла, так как в таком случае расходимость пучка будет определяться дифракцией и слабо зависеть от  $r_0$ . Таким образом, апертура формирующего телескопа выбиралась в диапазоне между минимальным  $r_0$  в точке наблюдения (8.3 см) и его удвоенным значением.

Отметим также, что для рэлеевских ЛОЗ оптимальный диаметр апертуры формирующего телескопа уменьшается пропорционально длине волны, что являляется также одной из причин выбора длины волны 532 нм, а не 355 нм, хотя интенсивность рэлеевского рассеяния для 355 нм была бы и выше.

На рис. 8 представлена конструкция формирующего рэлеевскую ЛОЗ телескопа. Технические характеристики разработанной системы рэлеевской ЛОЗ для телескопа Цейсс-2000 обсерватории Пик Терскол:

- источник излучения: Cypress nanosecond lasers (Китай), мощность до 50 Вт, длина волны 532 нм, длительность импульса 30 нс, частота повторения импульсов до 50 кГц, энергия импульса 0.55 мДж;
- проекционный телескоп: размер апертуры 12 см, параметр качества пучка M<sup>2</sup> < 1.4.</li>

#### 5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЕЛЕСКОПЕ ЦЕЙСС-2000 ОБСЕРВАТОРИИ ПИК ТЕРСКОЛ

Экспериментальное тестирование было проведено на телескопе Цейсс-2000 обсерватории Пик Терскол в сентябре 2024 г. с целью подтверждения энергетических характеристик, проверки оптико-механической стабильности углового положения источника при различных положениях трубы телескопа, а также уровня паразитных засветок измерительного канала. Разработанная система рэлеевской ЛОЗ располагается на боковой поверхности телескопа Цейсс-2000, как показано на рис. 9. Это позволит провести дальнейшую модернизацию, совместив ее либо еще с одним лазером для формирования полихроматической ЛОЗ, либо с лазером для натриевых ЛОЗ. Выбранная конструкция имеет преимущество перед центральным формированием рэлеевской ЛОЗ, которая требует переносить весь пучок лазера за вторичное зеркало, что приводит к значительному количеству рассеянного излучения, падающего на главное зеркало телескопа.

Выполненные испытания (одна сессия измерений) на дистанции ЛОЗ 4000 м показали, что результаты по регистрации энергии рассеянного излучения в целом соответствуют модельным предсказаниям энергетического расчета. Вместе с тем делать выводы по итогам всего лишь одного эксперимента кажется преждевременным. В обсерватории ожидается запуск независимого поста оценки астроклимата, сведения с которого предполагается использовать в дальнейших комплексных исследованиях эффективности формирования ЛОЗ рэлеевского типа для данной локации.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описаны конструктивные и технические особенности системы рэлеевской ЛОЗ как опорного источника АОС, создаваемой для телескопа Цейсс-2000 астрономической обсерватории Пик Терскол, расположенной на высоте 3150 м над уровнем моря. Описан выбор оптимальных взаимосвязанных параметров для разработанной системы ЛОЗ: размера апертуры телескопа, формирующего ЛОЗ телескопа, высоты формирования, длительности строба и параметров лазерного излучения. Проведено экспериментальное тестирование системы рэлеевской ЛОЗ на телескопе Цейсс-2000. Представленные численные оценки корреляционного радиуса  $r_0$  показывают, что использование АОС с рэлеевской ЛОЗ на данном телескопе позволит улучшить качество формируемого изображения на порядок. Предполагается, что на следующих этапах работ будет реализована схема коррекции угловой ошибки (tip-tilt)



Рис. 8. Конструкция проектора ЛОЗ.



Рис. 9. Рэлеевская ЛОЗ, установленная на телескопе Цейсс-2000 обсерватории Пик Терскол.

по естественной звезде и будут экспериментально проверены расчетные параметры АОС с использованием датчика Шака—Гартамана. Отметим, что выбор параметров, разработка системы в целом и эффективность ее функционирования непосредственно связаны с атмосферными условиями места расположения обсерватории Пик Терскол, что еще раз подчеркивает необходимость изучения астроклимата в действующих обсерваториях РФ для оснащения существующих телескопов системами адаптивной оптики и выбора места построения новых телескопов.

# ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института астрономии РАН и Института оптики атмосферы СО РАН.

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 80 № 2 2025

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. C. Baranec, J. Ou, R. Riddle, et al., SPIE Conf. Proc. **13097**, id. 130970G (2024).
- 2. E. A. Bendek, M. Hart, K. B. Powell, et al., SPIE Conf. Proc. **8149**, id. 814907 (2011).
- 3. V. A. Bogachev, A. A. Vereshchagin, M. V. Volkov, et al., SPIE Conf. Proc. **11916**, id. 1191617 (2021).
- 4. L. A. Bolbasova and V. P. Lukin, *Adaptive Correction* of *Atmospheric Distortions of Optical Images Based on an Artificial Reference Source* (Fizmatlit, Moscow, 2012) [in Russian].
- A. S. Gurvich, A. I. Kon, V. L. Mironov, and S. S. Khmelevtsov, *Laser radiation in the turbulent atmosphere* (Nauka, Moscow, 1976) [in Russian].

- R. Jensen-Clem, D. A. Duev, R. Riddle, et al., Astron. J. 155 (1), article id. 32 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aa9be6
- V. V. Kleimenov, I. Y. Vozmishchev, and E. V. Novikova, J. Optical Technology 88 (10), 569 (2021). DOI:10.1364/JOT.88.000569
- E. Kopylov, A. Larichev, N. Iroshnikov, and M. Sachkov, SPIE Conf. Proc. 13097, id. 1309738 (2024).
- 9. T. J. Morris (2005). Doctoral Thesis (Durham University, Durham, 2005).
- 10. S. I. Neizvestny, Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs. 17, 26 (1983).
- R. Penndorf, J. Optical Society of America 47 (2), 176 (1957). DOI:10.1364/JOSA.47.000176
- S. Rabien, R. Angel, L. Barl, et al., Astron. and Astrophys. 621, id. A4 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201833716
- A. Y. Shikhovtsev, C. Qing, E. A. Kopylov, et al., Remote Sensing 16 (12), id. 2102 (2024). DOI:10.3390/rs16122102

- A. Tokovinin, R. Cantarutti, R. Tighe, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **128** (970), 125003 (2016). DOI:10.1088/1538-3873/128/970/125003
- 15. A. V. Tokovinin, http://xray.sai.msu.ru/ ~mystery/html/tut\\_rus\\_rus/intro.html [in Russian].
- 16. R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, 3rd ed. (CRC Press, Florida, USA, 2011).
- U. Wandinger, Introduction to Lidar in Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Ed. by C. Weitkamp (Springer Science+Business Media, Inc., New York, 2005), pp. 1–18. DOI:10.1007/0-387-25101-4
- R. W. Wilson and C. R. Jenkins, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 278 (1), 39 (1996). DOI:10.1093/mnras/278.1.39

# Parameters of Formation of Rayleigh Laser Guide Star of Adaptive Optics for the Zeiss-2000 Telescope of the Terskol Peak Observatory

# A. V. Larichev<sup>1</sup>, E. A. Kopylov<sup>2</sup>, A. S. Goncharov<sup>1</sup>, L. A. Bolbasova<sup>2,3</sup>, V. P. Lukin<sup>3</sup>, N. G. Iroshnikov<sup>1</sup>, and M. E. Sachkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>2</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia <sup>3</sup>V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, 634055 Russia

In this paper, we describe the design and technical features of the Rayleigh laser guide star (LGS) system as a reference source of the adaptive optics system (AOS) intended for use on the Zeiss-2000 telescope of the Terskol Peak Astronomical Observatory (coordinates 43°27631 N, 42°49939 E), located at an altitude of 3150 m above sea level. Experimental testing of the Rayleigh LGS system on the Zeiss-2000 telescope was carried out. The presented numerical estimates of the correlation radius  $r_0$  show that in the future, the use of an AOS with a Rayleigh LGS on this telescope will improve the quality of the formed image by an order of magnitude.

Keywords: atmospheric effects—instrumentation: adaptive optics—techniques: laser guide stars