

Влияние ширины спектральной линии лазерного излучения на яркость натриевой лазерной опорной звезды в условиях среднеширотной атмосферы

Л.А. Больбасова[✉], С.А. Ермаков, В.П. Лукин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 06.02.2024;
после доработки 10.04.2024;
принята к печати 04.06.2024

Техника лазерных опорных звезд (ЛОЗ) является неотъемлемой частью современных адаптивных оптических систем наземных телескопов. Требования к энергетическим, спектральным и пространственно-временным характеристикам лазерного излучателя для создания натриевых ЛОЗ, как и к адаптивной оптической системе в целом, во многом связаны с атмосферными параметрами места расположения телескопа. Одним из аспектов оптимизации яркости натриевой ЛОЗ является выбор ширины линии лазерного излучения. На основе численного моделирования взаимодействия поляризованного лазерного излучения с круговой поляризацией с мезосферными атомами натрия в условиях среднеширотной атмосферы РФ оценено влияние ширины спектральной линии (от 10 МГц до 3,5 ГГц) лазерного излучения на величину обратного потока фотонов от натриевой лазерной опорной звезды. Эти исследования необходимы для определения требований к параметрам излучателя при создании ЛОЗ. Показано, что использование широкополосных лазерных источников приводит к уменьшению числа фотонов от ЛОЗ. Эти результаты могут быть использованы при разработке адаптивных оптических систем, работающих по сигналу лазерной опорной звезды.

Ключевые слова: лазерная опорная звезда, адаптивная оптика, атмосферная турбулентность, телескоп, астроклимат; laser guide star, adaptive optics, atmospheric turbulence, telescope, astroclimate.

Введение

Для работы адаптивной оптической (АО) системы наземного телескопа необходим источник опорной волны. Наиболее эффективным является искусственный опорный источник, который может быть сформирован на основе флуоресценции мезосферных атомов натрия, вызванной лазерным излучением. Такой источник получил название натриевая лазерная опорная звезда (ЛОЗ). При этом актуальной задачей остается обеспечение достаточного для работы датчика волнового фронта АО-системы потока фотонов от ЛОЗ [1, 2]. Один из аспектов оптимизации яркости натриевой ЛОЗ – выбор ширины линии лазерного источника, формирующего ЛОЗ. В целом требования к энергетическим, спектральным и пространственно-временным характеристикам излучателя для создания натриевых ЛОЗ во многом связаны с атмосферными параметрами места расположения оптико-электронной системы [3–9]. По этой причине практический интерес представляет определение оптимальной мощности лазерного

излучения, формирующего натриевую ЛОЗ, ширины полосы лазера, плотности мощности, при которой наступает эффект насыщения, для работы оптико-электронных систем в условиях среднеширотной атмосферы РФ. Ранее [9] на основе численного моделирования для атмосферных условий астрономических обсерваторий Северного Кавказа были оценены требуемая мощность и эффект насыщения при формировании натриевой ЛОЗ, но в предположении бесконечно малой спектральной ширины полосы лазера, что нереализуемо на практике.

К настоящему моменту разработан ряд лазерных источников, работающих на длине волны 589 нм, со спектральной шириной линии лазера от 8 МГц до 13 ГГц для формирования натриевой ЛОЗ [10–12]. При этом создание узкополосных лазерных излучателей на длине волны 589 нм остается сложной задачей. Применение широкополосных безмодовых лазеров для увеличения яркости ЛОЗ предложено в работах [13, 14].

Цель настоящей работы – на основе численного моделирования взаимодействия поляризованного лазерного излучения с мезосферными атомами натрия для условий среднеширотной атмосферы РФ определить влияние ширины спектральной линии лазерного излучателя на величину обратного потока фотонов от натриевой ЛОЗ.

* Лидия Адольфовна Больбасова (sla@iao.ru); Сергей Александрович Ермаков (ermakov_s98@mail.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

1. Метод и параметры численного моделирования

Для расчета ожидаемой флуоресценции натриевой ЛОЗ с помощью оптических уравнений Блоха для матрицы атомной плотности моделируется эволюция населенности уровней атомов натрия при взаимодействии с поляризованным лазерным излучением. Матрица плотности описывает статистическое состояние ансамбля атомов на магнитных подуровнях перехода D_2 натрия и является функцией скорости движения атомов вдоль направления распространения излучения лазера. Эволюция матрицы плотности задается уравнением Лиувилля – фон Неймана [10]:

$$\frac{d}{dt}\rho = \frac{1}{i\hbar}[H, \rho] + \Lambda(\rho) + \beta, \quad (1)$$

где ρ – матрица плотности; i – мнимая единица; $\hbar$ – постоянная Планка; H – полный гамильтониан, описывающий структуру атомного уровня и взаимодействие с внешними полями; $\Lambda(\rho)$ – феноменологический член, добавленный для учета релаксационных процессов, не описывается гамильтонианом; β – член, который описывает прохождение атомов через лазерный пучок и не зависит от ρ . Решения уравнения (1) дают линейную систему дифференциальных уравнений для элементов матрицы плотности, известных как оптические уравнения Блоха, которую можно записать в виде

$$\dot{\rho} = \mathbf{A}\rho + \mathbf{b}, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}$ и $\mathbf{b}$ – матрица и вектор соответственно; ρ – вектор-столбец элементов матрицы плотности. Вектор $\mathbf{b}$ соответствует члену β в уравнении (1), не зависит от ρ , определяя скорость попадания атомов в лазерный пучок, и зависит от скорости ветра и других процессов в мезосфере; матрица $\mathbf{A}$ соответствует остальным слагаемым в правой части уравнения (1) и включает члены, связанные с процессами релаксации, учитывает спонтанный распад, столкновения атомов с изменением скорости и световое давление, столкновительную спиновую релаксацию, выход атомов из лазерного луча, а также включает член, учитывающий полосу пропускания лазера. Уравнения эволюции матрицы плотности (2) генерируются с использованием пакета LGSBloch, который основан на пакете Atomic Density-Matrix Mathematica [16]. Отметим, что данные пакеты предназначены для моделирования непрерывного и импульсного режимов лазера широкополосного и узкополосного излучения, позволяя учесть многомодовый и одномодовый режимы. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает их хорошее совпадение в непрерывном режиме и завышение модельных значений в импульсном [17, 4].

Поток флуоресцентных фотонов на телесный угол, испускаемый в заданном направлении, находится из стационарного решения оптических уравнений Блоха как математическое ожидание опера-

тора флуоресценции. Чтобы учесть неоднородную картину излучения в мезосфере, LGSBloch предполагает распределение интенсивности по Гауссу, дискретизированное с помощью определяемого пользователем количества уровней излучения. Предполагается, что изменение количества атомов натрия с высотой описывается функцией Гаусса с максимумом на высоте 91 км и полной шириной на полувысоте ± 5 км от максимума (т.е. от 86 до 96 км). Выбор параметров моделирования для атмосферных условий РФ, в том числе параметров слоя натрия, описан в нашей работе [9]. В таблице приведены основные численные параметры, используемые в данных исследованиях.

Параметры численного моделирования

Параметр	Значение
Длина волны излучения, нм	589,159
Величина геомагнитного поля, Гаусс	0,48
Магнитное склонение, град	7,1
Магнитное наклонение, град	62
Высота слоя натрия, м	91000
Концентрация натрия, атомов/м ²	$2 \cdot 10^{13}$
Высота телескопа н.у.м., м	2050
Атмосферное пропускание	0,8
Температура, К	190
Апертура телескопа, формирующего ЛОЗ, м	0,2
Качество оптического пучка, M^2 фактор	1,2
Зенитный угол, град	0
Поляризация	Круговая

Под шириной спектральной линии лазерного излучения понимается расстояние между точками контура линии лазерного излучения, соответствующее половине интенсивности линии в максимуме [17]. Она варьировалась от 0 до 3,5 ГГц.

2. Результаты и обсуждение

Оценим эффект насыщения флуоресценции, когда среда становится прозрачной для излучения. На рис. 1 представлено изменение величины потока фотонов от натриевой ЛОЗ в мезосфере в зависимости от плотности мощности излучения при различной ширине спектральной линии лазерного излучения с круговой поляризацией. Отметим, что результаты для 0 и 10 МГц совпадают. Это означает, что представленные ранее в нашей работе [9] данные можно считать соответствующими спектральной линии лазера, равной 10 МГц.

Как видно из рис. 1, по мере увеличения ширины линии предельно достижимое число фотонов от ЛОЗ уменьшается. Однако при ширине линии 1 ГГц, несмотря на меньший предельно достижимый поток фотонов, эффект насыщения практически отсутствует, проявляясь при большей плотности мощности, чем для узкополосного лазерного излучения. Так, при достижении 100 Вт/м² величина потока равна 100 (фотонов/с/ср/атом)/(Вт/м²), в то время как для 100 МГц при той же плотности мощности излучения в мезосферном слое поток равен

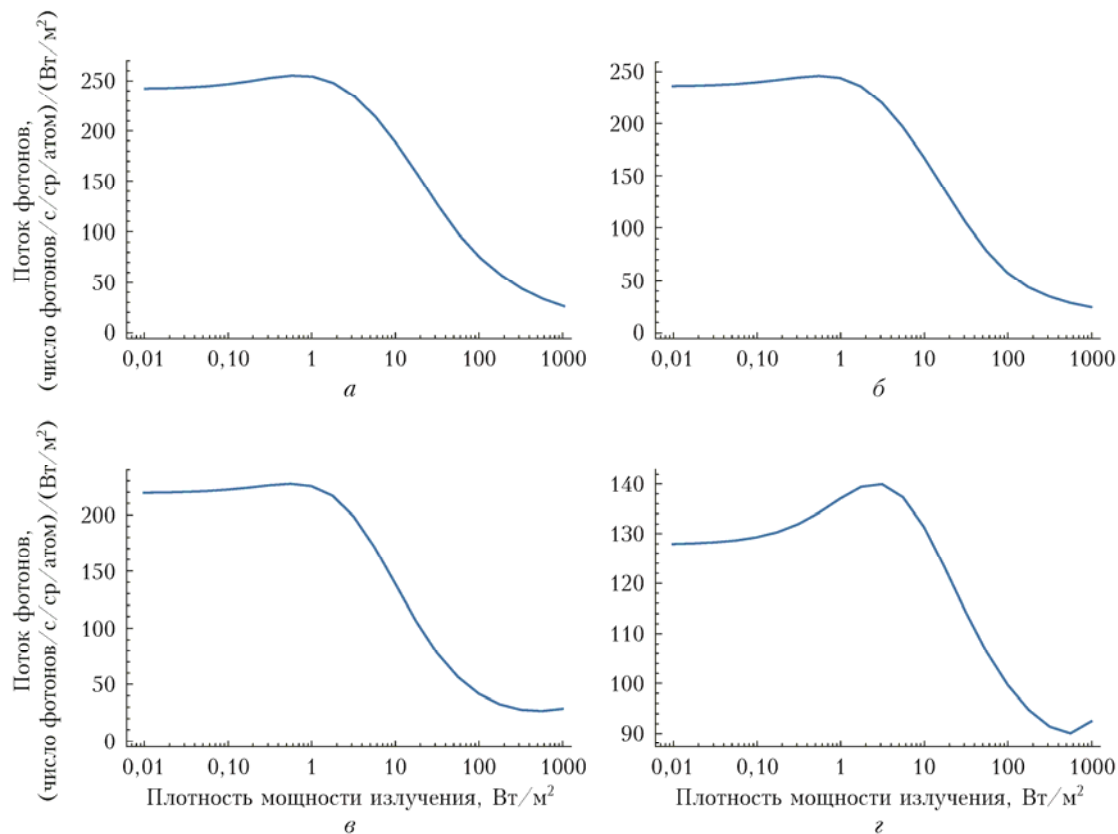


Рис. 1. Поток фотонов от натриевой ЛОЗ в мезосфере при ширине спектральной линии лазерного излучения с круговой поляризацией: *a* – 0 МГц; *б* – 10 МГц; *в* – 100 МГц; *г* – 1 ГГц

50 (фотонов/с/ср/атом)/(Вт/м²). Это означает, что применение широкополосного источника может как увеличить, так и уменьшить поток фотонов от ЛОЗ.

Натриевые ЛОЗ используют переход $3sS_{1/2} - 3pP_{3/2}$ в атомарном натрии, известный как линия D_2 . Основное состояние включает два сверхтонких мультиплета, объединяющие восемь магнитных подсостояний. Линия D_2 натрия состоит из линии D_{2a} (589,159 нм) и линии D_{2b} (589,157 нм), разделенных на 1,772 ГГц. Эти две группы соответствуют основным состояниям $F = 1$ и $F = 2$, где F – общее квантовое число атомного углового момента. Четыре мультиплета возбужденных состояний ($F = 0; 1; 2; 3$) разделены только на 16,5; 35,5 и 59,8 МГц [18]. Поскольку сечение поглощения линии D_{2a} в два раза больше, чем линии D_{2b} , центральная длина волны натриевого лазера обычно совпадает с линией D_{2a} . Естественная ширина линии натрия – 9,8 МГц. При мезосферных температурах около 190 К линии D_{2a} и D_{2b} уширяются за счет теплового движения атомов в мезосфере (доплеровский эффект) примерно до 1 ГГц каждая и имеют два неравных пика – характерный двугорбый профиль шириной ~ 3 ГГц [19]. Одним из методов увеличения яркости натриевой ЛОЗ является повторное возбуждение D_{2b} путем настройки частоты электрооптического модулятора со смещением линий $D_{2a} - D_{2b}$. Использование этого подхода, т.е. линии D_{2b} натрия после D_{2a} , может значительно увеличить количество возвра-

щаемых фотонов при использовании как лазера непрерывного действия, так и импульсного лазера [20]. Этим можно объяснить преимущество применения широкополосных лазеров, связанное с описанным выше эффектом, когда часть испускаемых фотонов обусловлена линией D_{2b} [21].

На рис. 2 представлена зависимость потока фотонов от ширины спектральной линии лазерного излучения с круговой поляризацией.

Для сравнения с результатами работы [9] на рис. 2, *a* представлены данные, полученные при изменении ширины спектральной линии от нулевых значений до 200 МГц, что является нереалистичным. Таким образом, использование лазеров с шириной спектральной линии 20–100 МГц менее эффективно. Когда ширина спектральной линии лазера превышает 2 ГГц, это также отрицательно влияет на величину обратного потока фотонов от ЛОЗ при любой мощности лазера.

Для лазерного излучения с круговой поляризацией мощностью 10 Вт обратный поток фотонов от натриевой ЛОЗ при ширине линии 1 ГГц выше, чем при ширине 10 МГц на 10%, на 20% – при мощности излучения 15 Вт и на 40% – при мощности 20 Вт. При мощности излучения 5–10 Вт оптимальна ширина линии 1 ГГц; она может быть увеличена до 1,5–2 ГГц при мощности 15–20 Вт.

В целом анализ результатов моделирования показывает, что ширина полосы должна выбираться в зависимости от мощности лазерного излучения.

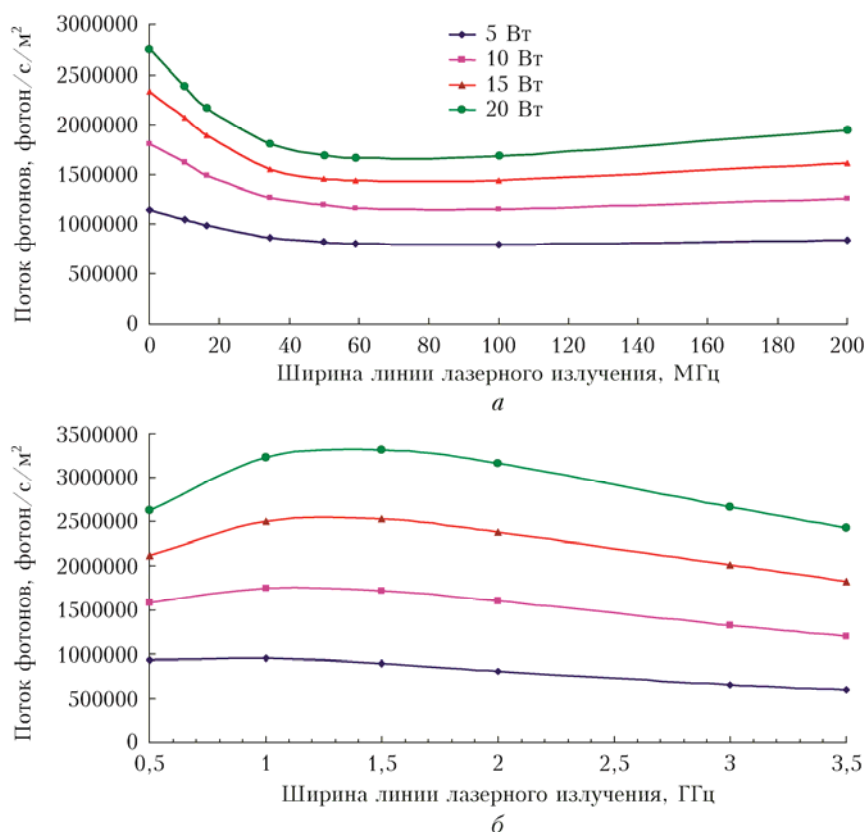


Рис. 2. Зависимость обратного потока фотонов от ЛОЗ от ширины спектральной линии лазерного излучения с круговой поляризацией на приемнике: 0–200 МГц (а); 0,5–3,5 ГГц (б)

Если ширины полосы лазерного излучения больше 2 ГГц, то это приводит к уменьшению числа фотонов от ЛОЗ, при этом использование узкополосных (50–500 МГц) лазерных источников также будет уменьшать предельно достижимый уровень сигнала от ЛОЗ.

На рис. 3 представлены зависимости потока фотонов от ЛОЗ от мощности лазерного излучения с круговой поляризацией для различной ширины спектральной линии. Они позволяют выбрать оптимальную ширину спектральной линии при известной мощности лазерного излучателя для создания ЛОЗ.

Зависимость числа фотонов от ширины спектральной линии лазерного излучения наиболее выражена для лазеров мощностью 10–20 Вт, следовательно, выбор оптимальной ширины линии лазерного излучения может увеличить поток фотонов в два раза. В этом случае широкополосные лазеры более предпочтительны.

Лазерное излучение с круговой поляризацией и шириной спектральной линии более 500 МГц (см. рис. 1) в меньшей степени вызывает эффект насыщения, но требования к мощности увеличиваются из-за снижения эффективности возбуждения атомов

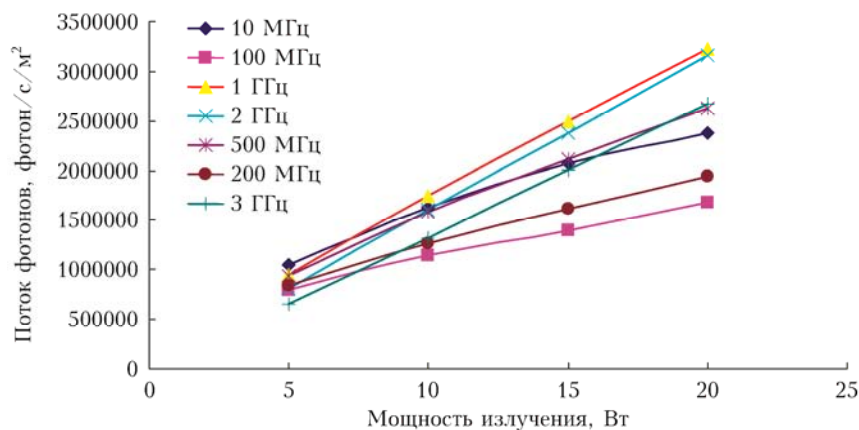


Рис. 3. Зависимость обратного потока фотонов от ЛОЗ от мощности лазерного излучения с круговой поляризацией для различной ширины спектральной линии

натрия, о чем свидетельствует низкий предельно достижимый поток фотонов от ЛОЗ.

Как известно, требования к лазерному источнику для создания натриевой ЛОЗ зависят от направления и величины геомагнитного поля, характерных для местонахождения обсерватории, а также от атмосферных условий, зенитного угла работы лазерного источника и др. Поэтому прямое сопоставление результатов, полученных в настоящей статье, с данными аналогичных исследований, выполненных разными авторами для других условий (см., например, [3, 5, 14, 15, 17]), не представляется возможным. Тем не менее отметим ряд ранее полученных результатов. Например, в [14] сообщается о преимуществе высокомошных лазерных источников с шириной полосы 1–100 МГц в многомодовом режиме, при этом величина магнитного поля практически в два раза меньше, чем в представленных исследованиях. В нашем исследовании многомодовый режим работы лазера не рассматривался, поскольку главной задачей было определение оптимальных параметров лазерного источника для создания ЛОЗ в обсерваториях РФ. Уменьшение потока фотонов от ЛОЗ при работе в многомодовом режиме для излучения с круговой поляризацией, т.е. с учетом влияния геомагнитного поля, было показано в [17] и связано как со структурой энергетических уровней натрия, так и с уменьшением доступных атомов для взаимодействия с излучением. Исследования для лазерного излучения с линейной поляризацией осталось за рамками нашей работы по той же причине — меньшая достижимая яркость ЛОЗ по сравнению с применением лазерного излучения с круговой поляризацией [9, 17, 15].

Заключение

На основе численного моделирования обратного потока фотонов от натриевой ЛОЗ для условий среднеширотной атмосферы РФ оценены требования к лазерному излучателю в части ширины спектральной линии лазерного излучения. Показано, что выбор ширины линии должен осуществляться с учетом мощности лазерного источника, формирующего натриевую ЛОЗ, и атмосферных условий места расположения обсерватории. Использование как узкополосных (20–100 МГц), так и широкополосных (более 2 ГГц) лазеров приводит к уменьшению числа фотонов от ЛОЗ. Отметим, что в приведенных в данной работе исследованиях не учитывался многомодовый режим работы лазера и предполагалась работа при нулевом зенитном угле. Увеличение зенитного угла будет уменьшать поток фотонов из-за атмосферного поглощения. Полученные численные результаты могут быть использованы при разработке систем АО, работающих по сигналу от ЛОЗ.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Список литературы

1. Bustos P.F., Holzlohner R., Rochester S., Bonaccini D., Hellemeier J., Budker D. Frequency chirped continuous-wave sodium laser guide stars: Modeling and optimization // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2020. V. 37. P. 1208–1218. DOI: 10.1364/JOSAB.389007.
2. Hellemeier J., Enderlein M., Hager M., Bonaccini C., Johnson R.L., Lison F., Byrd M.O., Kann L.A., Centrone M., Hickson P. Laser guide star return-flux gain from frequency chirping // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 511, N 3. P. 4660–4668. DOI: 10.1093/mnras/stac343.
3. Rochester S.M., Otarola A., Boyer C., Budker D., Eilerbroek B., Holzlohner R., Wang L. Modeling of pulsed-laser guide stars for the Thirty Meter Telescope project // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2012. V. 29. P. 2176–2188. DOI: 10.1364/JOSAB.29.002176.
4. Holzlohner R., Bonaccini D., Bello D., Budker D., Centrone M., Guidolin I., Hackenberg W., Lewis S., Lombardi G., Montilla I., Pedichini F., Pedreros Bustos F., Pfrommer T., Reyes Garcia Talavera M., Rochester S. Comparison between observation and simulation of sodium LGS return flux with a 20W CW laser on Tenerife // *Proc. SPIE*. 2016. V. 9909. P. 99095E–8. DOI: 10.1117/12.2233072.
5. Клеймёнов В.В., Новикова Е.В., Олейников М.И. О выборе диаметра апертуры зондирующего лазера в наземных адаптивных оптико-электронных системах при формировании натриевой опорной звезды // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21, № 1. С. 24–30. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-24-30.
6. Martinez N., D’Orgeville C., Grosse D., Lingham M., Webb J., Copeland M., Galla A., Hart J., Price I., Schofield W., Thorn E., Smith C., Gao Y., Wang Y., Blundell M., Chan A., Gray A., Fetzer G., Rako S. Debris collision mitigation from the ground using laser guide star adaptive optics at mount Stromlo observatory // *J. Space Saf. Eng.* 2022. V. 9, N 1. P. 106–113. DOI: 10.1016/j.jsse.2021.10.007.
7. Клеймёнов В.В., Возмищев И.Ю., Новикова Е.В. Эффективность применения моноэстетической схемы формирования лазерной опорной звезды // *Опт. журн.* 2022. Т. 89, № 11. С. 24–31. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-24-31.
8. Rui-Tao Wang, Hong-Yang Li, Lu Feng, Min Li, Qi Bian, Jun-Wei Zuo, Kai Jin, Chen Wang, Yue Liang, Ming Wang. First Sodium Laser Guide Star Asterism Launching Platform in China on the 1.8 m Telescope at Gaomeigu Observatory // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2023. V. 135, N 1045. P. 034502. DOI: 10.1088/1538-3873/acbe68.
9. Болбасова Л.А., Ермаков С.А., Лукин В.П. Моделирование яркости натриевой ЛОЗ, формируемой поляризованным излучением, для астрономических обсерваторий Северного Кавказа // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 9. С. 773–779. DOI: 10.15372/AOO20230909; Bolbasova L.A., Ermakov S.A., Lukin V.P. Simulation of return flux of sodium LGS generated by polarized light for astronomical observatories of the North Caucasus // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N S1. P. S94–S100. DOI: 10.1134/S1024856024010056.
10. Xiaowei Huo, Yaoyao Qi, Yu Zhang, Bin Chen, Zhenxu Bai, Jie Ding, Yulei Wang, Zhiwei Lu. Research development of 589 nm laser for sodium laser guide stars // *Opt. Laser. Eng.* 2020. V. 134. P. 106207–10627. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106207.

11. Yunpeng Cai, Jie Ding, Zhenxu Bai, Yaoyao Qi, Yulei Wang, Zhiwei Lu. Recent progress in yellow laser: Principles, status and perspectives // *Opt. Laser. Eng.* 2022. V. 152. P. 108113–108130. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108113.
12. Pengbo Jiang, Xin Ding, Jian Guo, Haiwei Zhang, Haifeng Qi, Ying Shang, Zhiqiang Song, Weitao Wang, Chen Wang, Guangqiang Liu, Chunmei Yao, Jiasheng Ni, Jianquan Yao. Research progress of crystalline Raman yellow lasers // *Opt. Laser Technol.* 2024. V. 169. P. 110072. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110072.
13. Pique J.-P., Farinotti S. Efficient modeless laser for a mesospheric sodium laser guide star // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2003. V. 20. P. 2093–2101. DOI: 10.1364/JOSAB.20.002093.
14. Liu X., Qian X., He R., Liu D., Cui C., Fan C., Yuan H. Effects of linewidth broadening method on recoil of sodium laser guide star // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 1315–1–17. DOI: 10.3390/atmos12101315.
15. Holzlöhner R., Rochester S.M., Bonaccini Calia D., Budker D., Higbie J.M., Hackenberg W. Optimization of CW sodium laser guide star efficiency // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 510. DOI: 10.1051/0004-6361/200913108.
16. Rochester S. Atomic Density Matrix package for Mathematica, LGSBloch package for Mathematica. URL: <https://rochesterscientific.com/ADM/> (last access: 20.12.2023).
17. Rampy R., Gavel D., Rochester S.M., Holzlöhner R. Toward optimization of pulsed sodium laser guide stars // *J. Opt. Soc. Am. B* 2015. V. 32. P. 2425–2434. DOI: 10.1364/JOSAB.32.002425.
18. ГОСТ Р ИСО 13695-2010 Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров. М.: Стандартинформ, 2011. 22 с.
19. Milonni P.W., Fugate R.Q., Telle J. Analysis of measured photon returns from sodium beacons // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1998. V. 15. P. 217–233. DOI: 10.1364/JOSAA.15.000217.
20. Moussaoui N., Holzlöhner R., Hackenberg W., Bonaccini Calia D. Dependence of sodium laser guide star photon return on the geomagnetic field // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 501, N 2. P. 793–799. DOI: 10.1051/0004-6361/200811411.
21. Li Lihang, Hongyan Wang, Weihong Hua, Yu Ning, Xiaojun Xu. Fluoreenhancing mechanism of optical re-pumping in sodium atoms for brighter laser guide star // *Opt. Express*. 2016. V. 24. P. 6976–6984. DOI: 10.1364/OE.24.006976.

L.A. Bolbasova, S.A. Ermakov, V.P. Lukin. The influence of laser linewidth on the brightness of sodium laser guide star in midlatitude atmosphere.

The technique of laser reference stars is an integral part of modern adaptive optical systems of ground-based telescopes. The requirements for the energy, spectral, and spatiotemporal characteristics of a laser beam for creating sodium laser guide star, as well as for the adaptive optical system as a whole, are largely related to the atmospheric parameters of telescope site. One aspect of optimizing the brightness of a sodium laser guide star is the choice of linewidth of the laser. In this work, based on numerical simulation of the interaction of laser radiation with mesospheric sodium atoms under the conditions of midlatitude atmosphere in the Russian Federation, the effect of laser bandwidth on the magnitude of the return photon flux from a sodium laser guide star is estimated to determine the requirements for the parameters of the laser. Results are presented for laser radiation with circular polarizations and linewidths from 10 MHz to 3.5 GHz.