

Моделирование яркости натриевой ЛОЗ, формируемой поляризованным излучением, для астрономических обсерваторий Северного Кавказа

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 27.03.2023 г.;
после доработки 25.05.2023 г.;
принята к печати 27.07.2023 г.

Представлены результаты численного моделирования яркости натриевой лазерной опорной звезды для астрономических обсерваторий Северного Кавказа в соответствии с современными представлениями о физике взаимодействия поляризованного лазерного излучения с мезосферными атомами натрия. Рассмотрены два случая формирования искусственного опорного источника лазерным излучением: с круговой и линейной поляризациями. Оценивается ограничение величины потока фотонов, обусловленное эффектом насыщения.

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

Введение

Для функционирования адаптивной оптической (АО) системы с лазерной опорной звездой (ЛОЗ) телескопа необходимо обеспечить достаточный для работы датчика волнового фронта уровень сигнала от ЛОЗ. Яркость ЛОЗ является одним из ключевых параметров при создании и функционировании АО-системы телескопа. Поэтому исследования, направленные на оптимизацию яркости натриевой ЛОЗ за счет оптимизации спектральных, временных, поляризационных характеристик и мощности лазерного излучения с длиной волны 589 нм, не теряют своей актуальности [1–14].

Отметим ряд подходов, предложенных в последние годы для увеличения яркости ЛОЗ: повторная накачка ЛОЗ [2], переключение направления круговой поляризации излучения накачки [3], чирпирование импульса накачки [4], импульсный режим работы лазера на частоте Лармора [5]. Решение задачи оптимизации яркости натриевой ЛОЗ связано с физикой взаимодействия лазерного излучения с атомами натрия мезосферы [1, 6, 9, 10, 12]. Впервые в работе [1] теоретически было доказано, что на величину излучения обратного рассеяния мезосферных атомов натрия при формировании ЛОЗ поляризованным излучением непрерывного лазера влияет магнитное поле Земли. Результаты измерения

яркости натриевой ЛОЗ в обсерватории SOR (Starfire Optical Range) при переключении поляризации лазерного излучения с линейной на круговую показали возможность увеличения числа фотонов в два раза, что явилось результатом взаимодействия с геомагнитным полем [7, 8]. При этом на практике увеличение обратного потока зависит от величины и направления магнитного поля по отношению к направлению распространения лазерного луча [9]. Когда телескоп отслеживает объект, угол между лазерным лучом и геомагнитным вектором постепенно меняется. Влияние этого поведения на изменение яркости ЛОЗ необходимо знать, а значит, необходимо учитывать параметры геомагнитного поля в месте расположения телескопа, поскольку наибольший эффект в увеличении яркости ЛОЗ достигается, когда лазерное излучение с круговой поляризацией распространяется параллельно магнитному полю и исчезает вследствие ларморовской прецессии, если лазерный пучок перпендикулярен направлению поля [6, 9].

Кроме магнитного поля температура и концентрация молекул кислорода и азота на высоте слоя натрия будут влиять на вероятность столкновения атомов натрия с этими молекулами в мезосфере [10]. Значения плотности атмосферных молекул и температуры мезосферы имеют сезонные вариации в зависимости от географического местоположения, так же как высота мезосферного слоя натрия и число атомов. Величина и направление магнитного поля значительно варьируются по всему земному шару. Поэтому оптимизация параметров лазерной

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

системы для максимизации яркости натриевой ЛОЗ должна решаться с учетом атмосферных условий в месте расположения телескопа. Внедрение систем ЛОЗ в обсерваториях РФ требует определения оптимальных параметров лазерного источника, в том числе необходимой мощности, от которой зависит его стоимость, при том что обратный поток фотонов от ЛОЗ ограничен эффектом насыщения.

В работе [10] опубликованы результаты самого полного и подробного исследования резонансной флуоресценции натрия при формировании ЛОЗ поляризованным излучением. Авторы учли физические эффекты, зависящие от условий окружающей среды, такие как ларморовская прецессия атомов натрия в геомагнитном поле, давление света, столкновения с газами мезосферы (азот, кислород), релаксационные процессы, спиновая поляризация, насыщение верхних уровней натрия. Отметим, что оценка сложного взаимодействия этих эффектов и получение количественных значений эффективности флуоресценции мезосферного натрия требуют моделирования с конкретными значениями параметров, соответствующих атмосферным условиям в месте расположения АО-системы с ЛОЗ. Решение этой задачи основано на использовании оптических уравнений Блоха. Были определены оптимальные параметры лазерных систем натриевых ЛОЗ в различных обсерваториях, показавшие хорошее согласие с экспериментальными данными [10–14].

Цель настоящей работы — определение оптимальных параметров лазерного излучателя для создания натриевой ЛОЗ для астрономических обсерваторий средних широт РФ. Для этого выполнено численное моделирование обратного потока фотонов от ЛОЗ для атмосферных условий Северного Кавказа в соответствии с современными представлениями о физике взаимодействия поляризованного лазерного излучения с мезосферными атомами натрия. Рассмотрены два случая формирования ЛОЗ лазерным излучением: с круговой и линейной поляризациями.

Постановка задачи и параметры моделирования

Физически увеличение обратного потока при круговой поляризации объясняется следующим образом [9]. Линия натрия D_2 — это переход между основным состоянием (уровнем $2S_{1/2}$) и возбужденным состоянием (уровнем $2P_{3/2}$). В магнитном поле каждый из уровней расщепляется на $2F + 1$ магнитных квантовых уровней. Основное состояние делится на два сверхтонких мультиплета с суммарными атомными угловыми моментами $F = 1$ и $F = 2$ и состоит из восьми магнитных подсостояний. Возбужденное состояние состоит из четырех мультиплетов с суммарными угловыми моментами атомов $F = 0, 1, 2, 3$ (всего 16 магнитных подсостояний). Атомы на уровне m могут перейти в верхнее состояние по правилу $\Delta m = -1, 0, +1$. Для линейно поляризованного света переходы с $\Delta m = 0$ разрешены, тогда как для света с круговой поляризацией

Δm равен либо $+1$, либо -1 . Облучение ансамбля атомов светом с круговой поляризацией на резонансной частоте разрешает переходы на уровни $F = 3, m = 3$ и $F = 2, m = 2$, в отличие от света с линейной поляризацией.

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 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 ρ представляет собой вектор-столбец элементов матрицы плотности; вектор $\mathbf{b}$ соответствует члену β в уравнении (1), а матрица $\mathbf{A}$ — остальным слагаемым в правой части. Матрица $\mathbf{A}$ включает члены, связанные с процессами релаксации: 1) члены, учитывающие спонтанный распад (γ_{sd}), столкновительную спиновую релаксацию (γ_s), столкновения с изменением скорости и световое давление (γ_{vcc}), выход атомов из лазерного луча (γ_{ex}); 2) член, учитывающий ширину полосы лазера как переменную скорости через несколько групп скоростей (γ_{bw}):

$$\mathbf{A} = i\hbar[H, \rho]^{-1} + \gamma_{sd} + \gamma_{vcc} + \gamma_s + \gamma_{ex} + \gamma_{bw}. \quad (3)$$

Поступление атомов в лазерный луч зависит от мезосферного ветра и других процессов, но не зависит от ρ . Скорость поступления атомов в луч

$$\mathbf{b} = \gamma_{ent} C_{Na}, \quad (4)$$

где γ_{ent} — скорость для каждого интервала группы скоростей; C_{Na} — общая концентрация натрия.

Более полное описание каждого из этих процессов и построения уравнений можно найти в [9, 10]. В настоящей работе выполнено численное моделирование яркости натриевой ЛОЗ для атмосферных условий Северного Кавказа, поскольку на одной широте (43° с.ш.) располагаются три астрономические

обсерватории, телескопы которых могут потенциально быть оснащены АО с ЛОЗ: Специальная астрофизическая обсерватория РАН, обсерватория «Пик Терскол» Института астрономии РАН, Кавказская горная обсерватория МГУ. Пиковая высота мезосферного слоя натрия и содержание атомов в слое имеют широтную зависимость, а значит, параметры слоя натрия можно считать одинаковыми для этих трех обсерваторий. Следуя работам [9–14], информация о направлении и амплитуде вектора магнитного поля были получены с использованием модели WMM (World Magnetic Model – всемирной магнитной модели) [15]. Она разрабатывается совместно с Национальным геофизическим центром данных США (National Geophysical Data Center) и Британской геологической службой, обновляется с интервалом в пять лет. Профили температуры и плотности молекул в мезосфере получены из NRLMSIS 2.0 [16] – эмпирической модели, которая моделирует атмосферу на высотах от земли до экзосферы и описывает среднее наблюдаемое поведение температуры и плотность восьми видов молекул с помощью параметрической аналитической формулировки. Профили ветра получены из модели горизонтального ветра HWM14 [17], представляющей собой эмпирическую модель горизонтального нейтрального ветра в верхней термосфере, основанной на данных о ветре, полученных со спутников, и наземных измерений.

Кроме мощности излучения важен выбор оптимального размера апертуры телескопа, используемого для формирования ЛОЗ. Поскольку размер пятна ЛОЗ и наличие спеклов определяется уровнем атмосферной турбулентности, размер апертуры телескопа был выбран 20 см исходя из уровня турбулентности (параметр Фрида $r_0 = 10$ см). Концентрация и высота слоя мезосферного натрия имеют широтную зависимость и были рассчитаны по эмпирическим формулам ранее [18]. В таблице представлены входные параметры для моделирования обратного потока фотонов от ЛОЗ.

Входные параметры моделирования обратного потока фотонов от ЛОЗ

Параметр	Значение
Величина геомагнитного поля B , Гс	0,48
Магнитное склонение D , град	7,1
Магнитное наклонение I , град	62
Высота слоя натрия H , м	91 000 (толщина 1200 м)
Высота телескопа н.у.м., м	2000
Атмосферное пропускание	0,7
Температура, К	170 (зима), 200 (лето)
Апертура телескопа, формирующего ЛОЗ d , см	20
Качество оптического пучка (параметр M^2)	1,2
Длина волны излучения, нм	589,159
Концентрация натрия, атом/м ²	$2 \cdot 10^{13}$ (лето), $4 \cdot 10^{13}$ (зима)

Уравнения эволюции матрицы плотности с численными параметрами, соответствующими атмосферным условиям в месте расположения астрономических обсерваторий Северного Кавказа (таблица), генерировались с помощью свободно распространяемого пакета LGSBloch в среде Mathematica [7], который основан на пакете Atomic Density Matrix [19]. Линейная система решается итерационным методом – методом подпространства Крылова, встроенного в Mathematica. Поток флуоресцентных фотонов на телесный угол, излучаемый в заданном направлении, определялся из стационарного решения для ρ как математическое ожидание (среднее) оператора флуоресценции [7]. Чтобы учесть неравномерную освещенность мезосферного слоя, используется гауссово распределение интенсивности излучения. Пакеты Atomic Density Matrix и LGSBloch применялись в ряде работ [10–14] для численных значений, соответствующих различным обсерваториям, и показали согласие с экспериментальными данными измерений [10, 12, 14].

Результаты моделирования и обсуждение

В результате численного моделирования получен обратный поток фотонов от ЛОЗ в единицах количество фотонов на атом в единицу времени в телесном угле, нормированные на Ватт на метр квадратный ((число фотонов/с/ср/атом)/(Вт/м²)). На рис. 1, *a* и *б* представлены результаты численного моделирования обратного потока при формировании натриевой ЛОЗ излучением с круговой и линейной поляризациями, когда направление лазерного луча и геомагнитного поля близки; рис. 1, *в*, *г* – то же самое, но при работе лазерного излучателя в зенит; рис. 1, *д*, *е* – когда направление лазерного пучка перпендикулярно направлению геомагнитного поля.

Максимум обратного потока от ЛОЗ достигается при круговой поляризации, когда направление лазерного луча и геомагнитного поля совпадают (рис. 1, *a*). При достижении плотности мощности в мезосфере (E) порядка 20 Вт/м² дальнейшее увеличение приводит к уменьшению числа фотонов от натриевой ЛОЗ, что обусловлено эффектом насыщения, ограничивающим возврат фотонов от натриевой ЛОЗ. С увеличением плотности энергии в лазерном импульсе доля атомов в верхних состояниях возрастает до предельного значения. При большей освещенности атомарная среда становится более прозрачной для излучения резонансной частоты и ЛОЗ становится менее эффективной. Данные рис. 1–3 позволяют оценить плотность мощности излучения при эффекте насыщения. При работе лазерного излучателя с круговой поляризацией и его направлении в зенит поток становится меньше, чем в случае на рис. 1, *a*, что связано с увеличением угла между направлением геомагнитного поля и лазерного пучка. При достижении мощности 10 Вт/м² поток фотонов уменьшается.

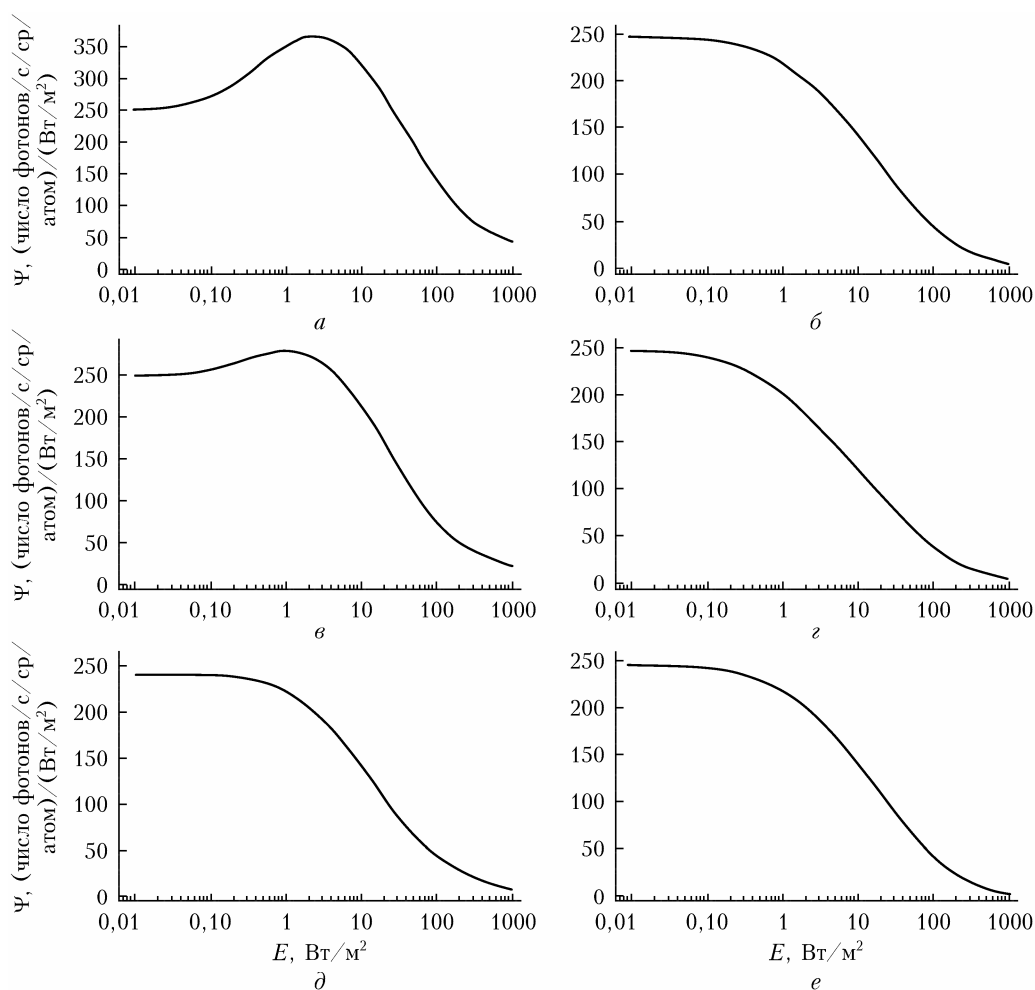


Рис. 1. Обратный поток фотонов в мезосфере при формировании натриевой ЛОЗ излучением с круговой (слева) и линейной (справа) поляризациями: при совпадении направлений лазерного луча и геомагнитного поля (*а* и *б*); при работе лазерного излучателя в зенит (*в* и *г*); при направлении лазерного пучка перпендикулярно геомагнитному полю (*д* и *е*)

При направлении лазерного пучка перпендикулярно направлению геомагнитного поля для излучения с круговой и линейной поляризациями получены идентичные результаты. При больших углах между лазерным лучом и силовыми линиями геомагнитного поля в слое натрия из-за ларморовской прецессии происходит перераспределение между магнитными подуровнями основного состояния, что уменьшает количество атомов, которые могут оптически накачиваться. Геомагнитное поле вызывает ларморовскую прецессию, которая подавляет поляризацию атомов, когда излучение перпендикулярно направлению геомагнитного поля. Как следствие, снижается флуоресценция атомов натрия, что иллюстрирует рис. 1. Сравнение полученных величин на рис. 1, *в*, *г* при формировании натриевой ЛОЗ излучением с круговой и линейной поляризациями при угле 90° между лазерным пучком и направлением геомагнитного поля показывает отсутствие преимущества применения излучения с круговой поляризацией. В результате яркость

натриевой ЛОЗ, формируемой излучением с круговой поляризацией, будет меняться в зависимости от направления излучения лазера, и для конкретного участка на небе будет иметь место соответствующая яркость ЛОЗ (рис. 1, *а*, *в*, *д*). Если ЛОЗ формируется линейно поляризованным излучением, то изменение угла между лазерным пучком и направлением геомагнитного поля не влияет на величину потока фотонов от ЛОЗ. Величина плотности мощности при насыщении одинакова при любом угле между магнитным полем и лазерным пучком и ограничена предельно достижимой величиной в слое натрия 1 Вт/м^2 . При достижении в мезосфере интенсивности 10 Вт/м^2 число фотонов уменьшается в два раза.

С точки зрения формирования натриевой ЛОЗ эквивалентна мезосферному лидару на основе резонансного рассеяния в парах натрия для измерений температуры и скорости ветра на высотах 90–100 км [20]. Главным отличием лидарных измерений от ЛОЗ является время накопления сигнала,

составляющее для лидаров минимум десятки секунд за одно измерение, в то время как АО-система с ЛОЗ должна работать с заданным быстродействием. Анализ флуоресценции натрия позволяет сделать вывод о концентрации, высоте слоев данных атомов, детектировать температуру атмосферы и скорость ветра. Именно при работе мезосферного лидара из-за более длительного времени экспозиции, по сравнению с ЛОЗ, эффект насыщения может ограничивать эффективность работы.

Далее рассмотрим случай работы лазера в зенит, т.е. когда зенитный угол равен нулю. Для вычисления ожидаемого обратного потока на приемнике Φ (фотон/с/м²) на расстоянии L от флуоресцирующих атомов натрия (L — разность высоты слоя и высоты расположения телескопа) рассчитывается поток при нескольких уровнях освещенности, затем выполняется интегрирование по освещенной площади в мезосфере, ортогональной лучу при заданном C_{Na} (атом/м²), с учетом пропускания атмосферы и эффекта насыщения. На рис. 2 представлены результаты моделирования величины потока фотонов, детектируемого приемником, при

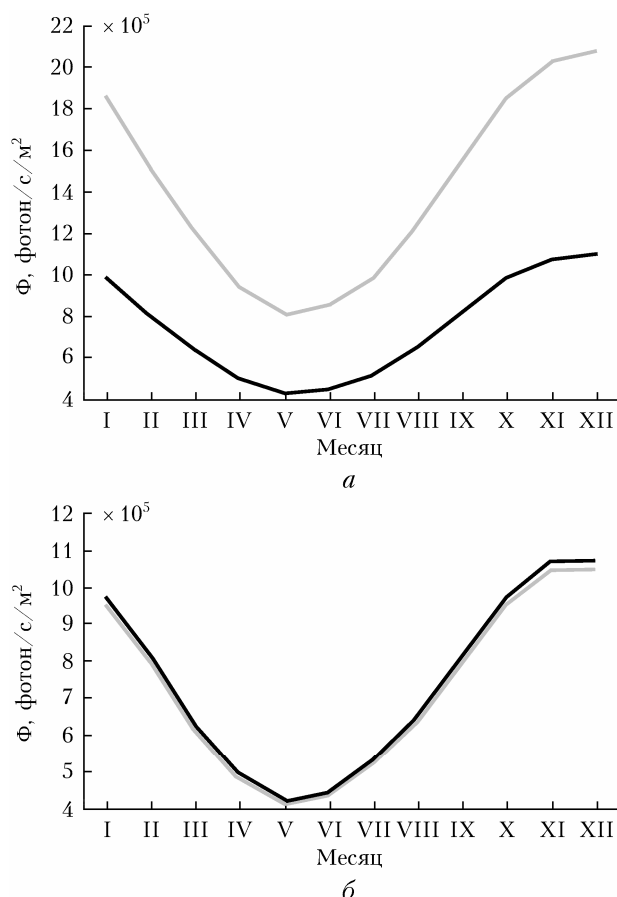


Рис. 2. Обратный поток на приемнике при формировании натриевой ЛОЗ лазерным излучением с круговой (серая кривая) и линейной (черная кривая) поляризациями с мощностью 10 Вт, когда пучок излучения параллелен (а) и перпендикулярен (б) геомагнитному полю

формировании натриевой ЛОЗ излучением мощностью 10 Вт, направленным параллельно и перпендикулярно геомагнитному полю, для каждого месяца для атмосферных условий Северного Кавказа.

Сезонная зависимость изменений параметров слоя натрия, характерная для средних широт, обуславливает максимальную яркость ЛОЗ в осенне-зимние месяцы. При угле 90° между направлением лазерного пучка и магнитного поля число фотонов от ЛОЗ, формируемой излучением с круговой и линейной поляризациями, практически не отличается.

На рис. 3 представлены зависимости числа фотонов на приемнике от мощности лазерного излучения для зимы и лета.

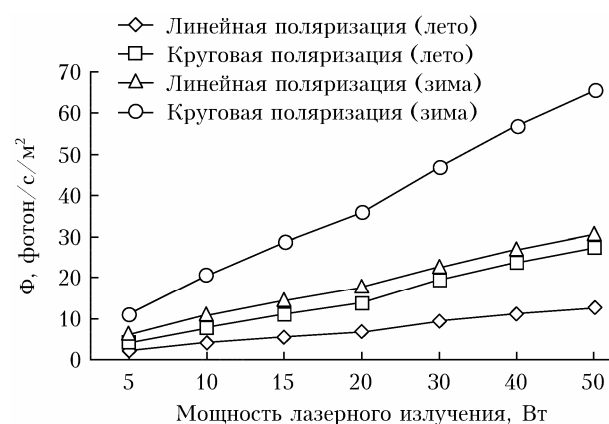


Рис. 3. Обратный поток от натриевой ЛОЗ в зависимости от мощности лазерного излучения для зимы и лета

Очевидна неэффективность лазерного излучения с линейной поляризацией для создания ЛОЗ даже при высокой мощности излучения, особенно летом при низкой концентрации атомов натрия. Это свидетельствует о важности учета сезонных вариаций атмосферных параметров (особенно параметров слоя натрия). Например, для достижения одинаковой яркости ЛОЗ зимой и летом требуется лазерный излучатель мощностью 15 и 25 Вт соответственно. При применении лазерного излучения с круговой поляризацией изменение мощности с 5 до 10 Вт увеличивает поток фотонов практически в два раза. Дальнейший рост мощности лазера не приводит к такому значительному увеличению числа фотонов. Например, усиление мощности с 20 до 30 Вт увеличит поток в 1,4 раза. Летом увеличения потока фотонов от ЛОЗ в два раза можно добиться изменением мощности с 10 до 35 Вт, в то время как зимой — с 10 до 25 Вт.

Подчеркнем, что пропускание атмосферы уменьшает предельно достижимое число фотонов от ЛОЗ, которые детектируются датчиком волнового фронта, при этом чем больше зенитный угол работы лазерного источника, тем меньше фотонов достигнут приемника.

Заключение

С целью определения оптимальных параметров лазерного источника для создания ЛОЗ в обсерваториях Северного Кавказа выполнено численное моделирование обратного потока фотонов от натриевой ЛОЗ с учетом поляризации лазерного излучения, качества пучка и атмосферных условий: пропускания атмосферы, температуры, высоты слоя мезосферного натрия и концентрации, параметров геомагнитного поля. Максимальный эффект от лазерного излучения с круговой поляризацией для создания натриевой ЛОЗ в данных обсерваториях достигается при ориентации телескопа, близкой к пределу наблюдения (зенитный угол лазера равен 60°). Работа в зенит лазерного излучателя с круговой поляризацией хотя и уменьшает предельно достижимую яркость ЛОЗ, но дает преимущества в яркости над излучателем с линейной поляризацией.

Отметим, что магнитное поле в рассматриваемых обсерваториях Северного Кавказа достаточно сильное по сравнению, например, с обсерваторией Параналь, где оно в два раза слабее ($B = 0,22$ Гс). При этом выраженное сезонное изменение параметров слоя натрия, характерное для средних широт и отсутствующее в обсерватории Параналь, приведет к уменьшению потока от ЛОЗ в два раза в летний сезон по сравнению с зимним. Эффект насыщения ограничивает обратный поток фотонов от натриевой ЛОЗ. Если зенитный угол работы лазерного излучателя равен нулю, для лазерного излучения с круговой поляризацией при достижении плотности мощности излучения 10 Вт/м^2 поток фотонов в мезосфере уменьшается. При линейной поляризации лазерного излучения эффект насыщения имеет место уже при достижении 1 Вт/м^2 в мезосферном слое натрия независимо от зенитного угла. При сканировании, когда ЛОЗ движется вместе с целью наблюдений для АО-системы, эффект насыщения может быть не важен, но будет играть роль при работе на длительных экспозициях. Полученные результаты представляют интерес для оптимизации параметров лазерного излучателя как для создания натриевых ЛОЗ для АО-систем телескопов, так и для лидарных систем, использующих резонансную флуоресценцию мезосферного натрия.

Еще раз подчеркнем, что знания атмосферных условий в месте расположения обсерватории необходимы как при проектировании системы АО, использующей ЛОЗ, так и при ее функционировании. Такие параметры системы, как коэффициент пропускания во время измерений, степень стабилизации длины волны, качество луча (параметр M^2), ширина полосы излучения, распределение освещенности в мезосфере должны быть оптимизированы для работы ЛОЗ АО-телескопа.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-22-00289).

Список литературы

1. *Milonni P.W., Fearn H., Telle J.M., Fugate R.Q.* The theory of continuous wave excitation of the sodium beacon // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999. V. 16. P. 2555–2566.
2. *Li Lihang, Hongyan Wang, Weihong Hua, Yu Ning, Xiaojun Xu.* Fluorescence enhancing mechanism of optical repumping in sodium atoms for brighter laser guide star // *Opt. Express*. 2016. V. 24. P. 6976–6984.
3. *Fan T., Zhou T., Feng Y.* Improving sodium laser guide star brightness by polarization switching // *Nat. Sci. Report*. 2016. V. 6. P. 19859–1–6.
4. *Xuezhong Yang, Lei Zhang, Shuzhen Cui, Tingwei Fan, Jinyan Dong, Yan Feng.* Sodium guide star laser pulsed at Larmor frequency // *Opt. Lett.* 2017. V. 42, N 21. P. 4351.
5. *Pedrerros Bustos F., Holzlohner R., Rochester S., Bonaccini Calia 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.
6. *Morris J.R.* Efficient excitation of a mesospheric sodium laser guide star by intermediate-duration pulses // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1994. V. 11. P. 832–845.
7. *Drummond J.D., Telle J.M., Denman C.A., Hillman P.D., Spinhirne J.M., Christou J.C.* Sky tests of a laser-pumped sodium guidestar with and without beam compensation // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5490. P. 12–22.
8. *Drummond J., Telle J., Denman C., Hillman P., Tuffli A.* Photometry of a sodium laser guide star at the starfire optical range // *PASP*. 2004. V. 116, N 817. P. 278–289.
9. *Moussaoui N., Holzlohner R., Hackenberg W., Bonaccini Calia D.* Dependence of sodium laser guide star photon return on the geomagnetic field // *A&A*. 2009. V. 501, N 2. P. 793–79.
10. *Holzlohner R., Rochester S.M., Bonaccini Calia D., Budker D., Higbie J.M., Hackenberg W.* Optimization of CW sodium laser guide star efficiency // *A&A*. 2010. V. 510. P. A20–1–14.
11. *Rochester S.M., Otarola A., Boyer C., Budker D., Ellerbroek 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.
12. *Hong-Yang Li, Lu Feng, Jian-Li Wang, Jie Liu, Sui-Jian Xue, Zhi-Xia Shen.* Simulation study of on sky performance of a new 20 W class macro–micro pulse laser for sodium laser guide star // *PASP*. 2021. V. 133, N 1021.
13. *Hellemeier J., Enderlein M., Hager M., Bonaccini Calia D., Johnson R.L., Lison F., Byrd M.O., Kann L.A., Centrone M., Hickson P.* Laser guide star return-flux gain from frequency chirping // *MNRAS*. 2022. V. 511, N 3. P. 4660–4668.
14. *Holzlohner R., Bonaccini D., Bello D., Budker D., Centrone M., Guidolin I., Hackenberg W., Lewis S., Lombardi G., Montilla I., Pedichini F., Pedrerros Bustos F., Pfrommer T., Reyes Garcia Talavera M., Rochester S.* Comparison between observation and simulation of sodium LGS return flux with a 20 W CW laser on Tenerife // *Proc. SPIE*. 2016. V. 9909 P. 99095E.
15. *WMM: World Magnetic Model.* URL: <https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml> (last access: 20.02.2022).

16. *NRLMSIS 2.0*: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. URL: <https://kawaii.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/msis> (last access: 20.02.2022).
17. *HWM*: Horizontal Wind Model. URL: <https://www.alpendac.eu/vao/hwm> (last access: 20.02.2022).
18. *Bolbasova L., Lukin V., Ermakov S., Soin E.* The problem of measuring the global tilt from laser guide star // *Proc. SPIE*. 2022. V. 12341. P. 123410X-1–5.
19. *Rochester S.M.* Atomic Density Matrix package for Mathematica. URL: <http://budker.berkeley.edu/ADM/> (last access: 20.02.2022).
20. *Матвиенко Г.Г., Марицев В.Н., Бобровников С.М., Яковлев С.В., Чистилин А.Ю., Сауткин В.А.* Мезостратосферный лидар для гелиогеофизического комплекса // *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 93–104.

L.A. Bolbasova, S.A. Ermakov, V.P. Lukin. Simulation of sodium LGS return flux formed by polarized light for astronomical observatories of the North Caucasus.

The results of numerical simulation of the return flux from a sodium laser guide star for atmospheric conditions of astronomical observatories of the North Caucasus are presented. The simulation was performed in accordance with modern concepts of the physics of the interaction of polarized laser radiation with mesospheric sodium atoms. Two cases are considered: the formation of an artificial reference source by laser radiation with circular and linear polarizations. The limitations of the photon flux due to the saturation effect are estimated.