

# АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИМОРФНОГО КОРРЕКТОРА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИЧЕСКОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-9-4-13

**Топоровский Владимир Владимирович**,  
институт динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского;  
Московский технический университет связи и информатики,  
Москва, Россия, [toporovskii\\_v@mail.ru](mailto:toporovskii_v@mail.ru)

**Manuscript received** 10 June 2025;  
**Accepted** 17 August 2025

**Галактионов Илья Владимирович**,  
институт динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского;  
Московский технический университет связи и информатики,  
Москва, Россия, [ilya.galaktionoff@gmail.com](mailto:ilya.galaktionoff@gmail.com)

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, адаптивная оптика, биморфное деформируемое зеркало, передача лазерного излучения, оптическая беспроводная связь, число Штреля

Широкое применение адаптивных оптических систем для обеспечения подавления негативных эффектов атмосферной турбулентности в задачах лазерной оптической связи приводит к необходимости модернизации и расширению элементной базы. Создание пьезоэлектрических корректоров волнового фронта биморфного типа для компенсации искажений лазерного излучения вызывает необходимость оптимизации ключевых параметров гибких зеркал, таких как частота первого резонанса и амплитуда деформации отражающей поверхности. Целью исследования является нахождение оптимальных параметров частоты первого резонанса и локальной деформации поверхности под действием управляющего напряжения для пьезоэлектрических зеркал биморфного типа в зависимости от значений структурной постоянной показателя преломления, радиуса когерентности и скорости ветра на атмосферных оптических трассах. Решение задачи нахождения оптимальных величин деформируемого зеркала оценивается по значению числа Штреля через анализ величины среднеквадратичной погрешности коррекции по апертуре. Определение строится на предположении, что большая часть суммарной погрешности расходуется на погрешность формы, возникновение которой зависит от недостаточного количества степеней свободы управляющих элементов деформируемого зеркала, а, соответственно, лимитированного уровня компенсируемых пространственных частот, которые он может скорректировать; помимо этого из-за величины временной погрешности, накладывающей ограничения на широту полосы управления всей адаптивной оптической системой. Для известных параметров атмосферы можно рассчитать расстояние между управляющими элементами и необходимую ширину полосы управления и получить желаемое число Штреля. Оптимизация параметров зеркала была выполнена для типичных параметров атмосферной турбулентности в городских условиях, учитывая трассу в 500 метров, лазерный пучок диаметром 300 мм при структурной постоянной показателя преломления  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$  с радиусом когерентности в 52 мм при длине волны в 1064 нм и скорости ветра 5 м/с. В качестве параметров зеркала были использованы материалы составляющих зеркала, радиусы и толщины пассивной подложки и пьезоэлектрической пластины, и диапазон управляющих напряжений. Определено, что толщина кремниевой подложки должна составлять 1,3 мм, а пьезодиска 0,2 мм, чтобы корректировать фазовые флуктуации с амплитудой не менее  $\pm 1,85 \text{ мкм}$  при управляющем напряжении в диапазоне от -200 до +250 В. Радиус зеркала должен быть 20 мм, что позволит увеличить частоту первого резонанса зеркала и даст возможность корректировать быстроменяющиеся aberrации волнового фронта. Практическая значимость: коррекция крупно- и мелкомасштабных aberrаций непрерывного лазерного излучения при помощи биморфного деформируемого зеркала с улучшенными характеристиками обеспечивает повышение качества передачи лазерного излучения вдоль оптического тракта. Обсуждение: представленная методика анализа параметров биморфного деформируемого зеркала позволит провести теоретическую оценку эффективности работы адаптивных оптических систем при различных условиях атмосферы с точки зрения коррекции пространственных и временных характеристик турбулентности Колмогоровского спектра.

## Информация об авторах:

**Топоровский Владимир Владимирович**, младший научный сотрудник, институт динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского, Москва, Россия; инженер квантового центра, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

**Галактионов Илья Владимирович**, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, институт динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского, Москва, Россия; инженер квантового центра, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

## Для цитирования:

Топоровский В.В., Галактионов И.В. Анализ характеристик биморфного корректора волнового фронта для задач оптической беспроводной связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №9. С. 4-13.

## For citation:

V.V. Toporovsky, I.V. Galaktionov, "Analysis of bimorph wavefront corrector for free-space communication application," T-Comm, 2025, vol. 19, no. 9, pp. 4-13. (in Russian)

## Введение

Системы беспроводной оптической связи на данный момент приходят на смену распространенным сетям с использованием сигнала радиочастотного или микроволнового диапазона для обеспечения передачи информации. Источником излучения подобных систем являются лазерные передающие системы видимого или ближнего инфракрасного спектра [1-4]. С точки зрения создания линий связи передача информации посредством оптического излучения обладает некоторыми преимуществами, которые выражаются в виде обеспечения широкой полосы пропускания, низкой задержки, а также высокой стойкости к электромагнитным помехам [5].

Тем не менее при распространении лазерного излучения вдоль оптического тракта возникает проблема с наличием рассеяния на аэрозольных частицах [6] и атмосферной турбулентности, возникающей ввиду неоднородности нагрева подстилающей поверхности и наличия локальных флуктуаций показателя преломления [7]. Подбор длины волны излучения с точки зрения наличия в атмосфере так называемых «окон прозрачности» приводит к существенному снижению эффекта рассеяния электромагнитных волн оптического излучения [8].

Атмосферная турбулентность как физическое явление приводит к возникновению неравномерных флуктуаций фазы оптического излучения при распространении его через приземные слои атмосферы. Данный эффект обнаруживается в анализе пучка при фокусировке излучения в дальнем поле, когда наблюдаются зональные перераспределения интенсивности, снос сфокусированного пятна, локальные максимумы/минимумы энергии освещенности на удаленном объекте [9]. Подобные процессы значительно снижают эффективность передающих систем и последующей доставки к получателю.

В литературе известны различные техники подавления эффектов турбулентности на передаваемое оптическое излучение. Среди них может быть произведено разделение по двум крупным группам методик: пассивные и активные. Пассивные представляют собой способы, где прямого воздействия на передающий сигнал не производится при помощи механических или оптических элементов. Фактически данная группа ограничивается методами алгоритмизации и пространственного/частотного разнесения сигнала [10, 11]. Вторая группа включает в себя различные средства, позволяющие снизить оптическую разность хода лучей, составляющих поверхность волновой фронт лазерного излучения. К таким методам относятся фазовое комбинирование пучков [12, 12] и средства адаптивной оптики [13]. В существующих системах оптической связи в лабораторных и полевых экспериментах успешно были применены различные модификации адаптивных оптических систем [14-17].

В состав традиционной адаптивной оптической системы замкнутого цикла входит корректор волнового фронта (зачастую представленный деформируемым зеркалом) [18], датчика для измерения искажений волнового фронта [19] и системы управления, реализующей связь между датчиком и корректором [20]. Базовым элементом любой адаптивной оптической системы является корректор волнового фронта, к которому предъявляются основные требования.

Существуют различные исполнения подобных элементов, например, механические [21], мембранные [22], МЭМС [24], магнитоотрицательные [25], термодформируемые [26], пьезоактуаторные [27]; биморфные [28].

Успешность коррекции aberrаций волнового фронта во многом зависит от удачного выбора корректора волнового фронта. Так как при передаче лазерного излучения через турбулентную атмосферу возникает необходимость в коррекции преимущественно крупномасштабных флуктуаций фазы с плавной формой отражающей поверхности, то самым оптимальным вариантом видится использование биморфных деформируемых зеркал.

В связи с расширением элементной базы адаптивной оптики растёт потребность в теоретическом определении эффективности работы исполнительных механизмов системы. Тем самым, основной фокус в данной работе будет сконцентрирован на анализе характеристик биморфного деформируемого зеркала и их оптимизации с целью повышения качества передачи лазерного излучения вдоль оптического тракта.

## Передача лазерного излучения через турбулентную атмосферу

В адаптивной оптике для оценки исправления фазовых aberrаций используется число Штреля [29], которое представляет собой соотношение между интенсивностью в фокальной точке изображения с искажениями и интенсивностью в той же точке при отсутствии искажений:

$$S = \frac{\max(I_{aber.})}{I_{dif}} \quad (1)$$

При малой остаточной погрешности коррекции число Штреля находится из формулы [29]

$$S = e^{-\sigma^2} \quad (2)$$

где  $\sigma^2$  – среднеквадратичная погрешность коррекции по апертуре (в рад<sup>2</sup>).

Указанное приближение остается справедливым до  $\sigma = 2$  рад [30]. В соответствии с критерием Марешаля [29], принято считать, что система успешно компенсирует aberrации волнового фронта, если коэффициент Штреля удастся довести до значения 0,8.

Производительность коррекции, осуществляемой адаптивной оптической системой, может быть представлена следующим образом:

$$\sigma^2 = \sigma_{fit}^2 + \underbrace{\sigma_{temp}^2 + \sigma_{meas}^2 + \sigma_{delay}^2}_{\sigma_{crit}^2} + \sigma_{cal}^2 \quad (3)$$

Основные источники ошибок и их краткое описание дано в таблице 1.

Рассмотрение величины остаточных aberrаций и оценка эффективности работы системы может быть упрощено из такого допущения, что преимущественный вклад составляют погрешности  $\sigma_{fit}^2$  и  $\sigma_{temp}^2$ , именно поэтому остальные источники ошибок для упрощения дальнейшего анализа не учитываются.

Таблица 1

Источники ошибок в адаптивной оптической системе

$S_{fit}$	Погрешность «формы»	Складывается путем оценки количества управляющих элементов и статических характеристик корректора волнового фронта по исправлению высоких пространственных частот aberrаций
$S_{temp}$	«Временная» погрешность	Возникает из-за ограниченности полосы пропускания системы адаптивной оптики
$S_{meas}^2$	Погрешность «измерения»	Суммируется из всех видов ошибок, связанных с процессом измерения, включая шумы датчика волнового фронта
$S_{delays}^2$	Погрешность «задержки»	Обусловлена временными задержками в каналах передачи данных из-за специфики интерфейсов
$S_{ctrl}^2$	Погрешность «управления»	Ошибки, включающие погрешности измерения и временные задержки
$S_{cal}^2$	Погрешность «калибровки»	Учитывает ошибки, возникающие при калибровке оптических элементов системы, необходимой для компенсации исходных aberrаций [36]

Оценка погрешности «формы» производится по следующей формуле:

$$\sigma_{fit}^2 = a \left( \frac{D_r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} N_{act}^{-\frac{5}{6}} \quad (4)$$

где  $a$  – коэффициент формы, определяемый типом корректора [32];  $D_r$  – апертура принимающего телескопа (м);  $r_0$  – радиус когерентности Фрида (м);  $N_{act}$  – количество управляющих элементов корректора.

$$a = \begin{cases} 0.28 & \text{для пьезоактюаторного деформируемого зеркала} \\ 0.335 & \text{для биморфного деформируемого зеркала} \\ 1.26 & \text{для сегментированного зеркала} \\ & \text{с возможностью перемещения «вверх-вниз»} \end{cases}$$

В свою очередь, радиус (параметр) Фрида для вертикальной трассы определяется как

$$r_0 = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{\cos(\zeta)} \int_0^\infty C_n^2(h) dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (5)$$

а для горизонтальной трассы радиус когерентности описывается следующей формулой:

$$r_0 = 3.02(C_n^2 R k^2)^{-\frac{3}{5}} \quad (6)$$

Параметр Фрида  $r_0$  представляет собой характерный пространственный масштаб, который лежит в диапазоне от 5 мм до 25 см [30]. Параметр Фрида соответствует апертуре  $D_r$  приемного телескопа, для которого дисперсия  $\sigma_{wf}^2$  aberrаций волнового фронта составляет примерно 1 рад<sup>2</sup>. При этом дисперсия может быть выражена как [3333]:

$$\sigma_{wf} = 1.03 \left( \frac{D_r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (7)$$

Существует аналогичная величина, описывающая характерный временной масштаб для изменений aberrаций волнового фронта [34]: время когерентности атмосферы  $\tau_0$ . Имеются различные определения этого термина [29, 35], в данном случае он описывается как время, в течение которого ветер переносит турбулентность замороженного потока через отверстие размером  $r_0$ .

Исходя из упомянутых предположений, это будет означать, что скорость ветра является показателем времени когерентности  $\tau_0$  (времени «замороженности» атмосферы). Пусть время когерентности  $\tau_0$  (с) выражается через обратную ему частоту Гринвуда  $f_G$  (Гц) [36]:

$$f_G = \frac{1}{\tau_0} = 2.31\lambda^{-\frac{6}{5}} \left[ \frac{1}{\cos(\zeta)} \int_0^\infty C_n^2(h) v^{\frac{5}{3}}(h) dh \right]^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

где  $h$  – высота (м);  $\lambda$  – длина волны излучения (м).

Для одного слоя турбулентности с постоянной скоростью ветра  $v_w$  частота Гринвуда может быть аппроксимирована следующим образом:

$$f_G = 0.43 \frac{v_w}{r_0} \quad (9)$$

Анализ динамических характеристик адаптивной оптической системы оценивается с учетом величины частоты Гринвуда  $f_G$  посредством следующего выражения [36]:

$$\sigma_{temp}^2 = m \left( \frac{f_G}{f_c} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (10)$$

где  $f_c$  – рабочая частота адаптивной оптической системы (Гц);  $m$  – коэффициент масштабирования.

Масштабирующий коэффициент  $m$  зависит от качества коррекции искажений aberrаций волнового фронта лазерного излучения адаптивной оптической системой  $f_c$ . В случае компенсации искажений низкочастотных флуктуаций фазы без взаимовлияния на высокочастотные составляющие спектра, что представляет собой идеализированный сценарий, данный коэффициент принимается равным 0,191 [32]. При этом в реалистичных оптических схемах, применяющихся в системах передачи оптического излучения, множитель  $m$  составляет 1.

Для оптимизации характеристик биморфного деформируемого зеркала были использованы параметры турбулентной атмосферы, типичные для городских условий густонаселенного города, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры турбулентной атмосферы, типичные для городских условий

Параметр	Значение
Диаметр передающей апертуры, мм	300
Структурная постоянная показателя преломления, м <sup>-2/3</sup>	5*10 <sup>-14</sup>
Радиус когерентности, м	0,052
Скорость ветра, м/с	5
Длина волны, нм	1064
Частота Гринвуда, Гц	41

Согласно формуле (7), при  $D_r = 300$  мм и  $r_0 = 0,052$  м ( $\lambda = 1064$  нм) максимальное значение амплитуды искажений  $P-V$  (от англ. peak-to-valley – амплитуда между максимальным и минимальным значением) составит  $\sigma_{\text{эф}}^2 = 1,03$  ( $D_r/r_0$ )<sup>5/3</sup> = 19,2 рад<sup>2</sup>.

Для приложений адаптивной оптики значения среднеквадратичное отклонение  $СКО$  и  $P-V$  часто связаны с помощью масштабного коэффициента 5, что дает значение амплитуды  $5 \cdot \sqrt{19,2} = 21,92$  рад [32].  $\lambda = 1064$  нм, это соответствует максимальной амплитуде искажений  $\lambda/2\pi \cdot 31,02 = \pm 3,7$  мкм ( $\sim \pm 3,5\lambda$ ). Тем не менее, при деформации отражающей подложки зеркала оптическая длина пути луча удваивается (рис. 31), в связи с этим для коррекции aberrаций волнового фронта амплитуда деформации корректора может быть снижена в два раза и составить  $\pm 1,85$  мкм.

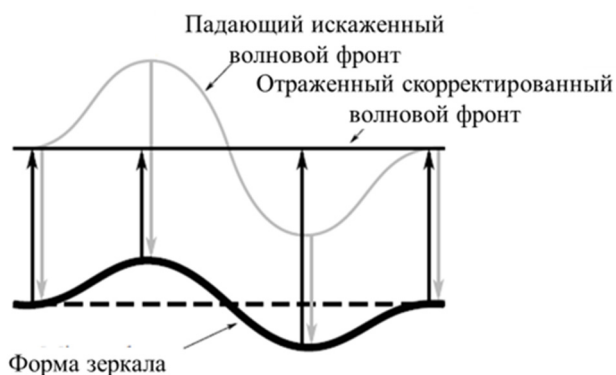


Рис. 1. Описание волнового фронта в двухпроходной оптической системе (Суммарные длины всех пар черных и серых стрелок равны)

Частота работы адаптивной оптической системы  $f_c$  при коррекции атмосферной турбулентности, меняющейся с частотой Гринвуда  $f_G$ , определяется по следующей формуле [37]:

$$f_c = \frac{f_G}{(-\ln(S))^{3/5}} \quad (11)$$

где  $S$  – фактор Штреля (должен быть не менее 0,8)

Согласно формуле (11), для скорости ветра 5 м/с и радиуса когерентности 52 мм частота Гринвуда составит около 41 Гц. Поэтому частота коррекции aberrаций в адаптивной оптической системе должна быть не менее 70 Гц. При этом, согласно [38, 39] частоту работы системы необходимо иметь на порядок выше, то есть не менее 700 Гц (кадров в секунду).

### Оптимизация параметров биморфных корректоров волнового фронта

Для создания биморфного деформируемого зеркала зачастую используются подложки из оптических материалов, к которым относятся стекло, кремний, медь. На тыльную поверхность подложки наносится проводящее покрытие для создания общего электрода после чего крепится пьезокерамическая пластина при помощи беззасадочного клея.

Внешняя сторона пьезопластины с электропроводящим слоем из серебра или никеля покрывается сеткой электродов для локального управления формой волнового фронта (рис. 2). При подаче корректирующих напряжений на

электроды, поперечный пьезокерамический эффект вызывает расширение (или сжатие) пьезопластины, что приводит к деформации (изгибу) отражающей поверхности зеркала. Путём изменения величин и последовательности подачи управляющих сигналов на электроды, можно добиться желаемой формы отражающей поверхности.

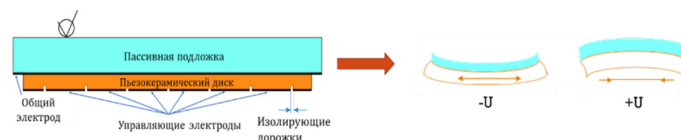


Рис. 2. Схема биморфного деформируемого зеркала с принципом работы

Типичный процесс создания биморфного зеркала включает в себя следующие шаги:

- приклеивание пьезокерамической пластины к подложке;
- формирование электродной сетки на пьезопластине с использованием фотолитографии либо лазерной гравировки;
- полировка подложки для достижения высокого качества отражающей поверхности;
- нанесение высокоотражающего покрытия (>99,9%);
- присоединение контактных проводов к зеркальным электродам токопроводящим клеем;
- электропроводка и монтаж зеркала в корпусе.

Для пьезопластины с площадью  $S$ , изменение площади  $\Delta S$  определяется как (рис. 3) [40]

$$\Delta S \approx \frac{2VSd_{31}}{t}, \quad (12)$$

где  $d_{31}$  – поперечный пьезоэлектрический коэффициент (Кл/Н);  $V$  – прикладываемое напряжение (В);  $t$  – толщина пьезокерамического диска (м).

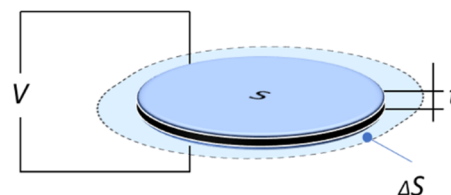


Рис. 3. Схематическое изображение изменения площади  $\Delta S$  пьезопластины толщиной  $t$  при приложении напряжения  $V$

Деформация поверхности биморфного зеркала также зависит от площади электрода. Чувствительность круглого биморфного корректора  $S_b$  показывает амплитуду деформации поверхности под действием управляющего напряжения, которая зависит от диаметра пьезокерамического диска, величины приложенного напряжения и радиуса кривизны зеркальной поверхности и определяется выражением:

$$S_b = \frac{d^2}{8RV} = \frac{d^2}{4t^2} d_{31} \quad (13)$$

где  $d$  – диаметр пьезокерамического диска (м);  $R$  – радиус кривизны полупассивного биморфного деформируемого зеркала (м).

Для анализа общей и локальной амплитуды деформации поверхности отталкиваются от материалов биморфного корректора, а также от других факторов, таких как толщины

пластин зеркал, величины прикладываемого электрического поля, площади управляющих элементов. Чтобы увеличить амплитуду деформации, очевидным является уменьшение толщины зеркала, это возможно при использовании более тонкой пьезопластины, а также снижения толщины пассивной подложки.

Увеличение площади электродов можно произвести за счет снижения ширины изолирующих дорожек, в этом случае также необходимо уменьшить диапазон прикладываемых напряжений, чтобы избежать возникновения межэлектродного пробоя [41]. В случае увеличения плотности управляющих элементов биморфного зеркала, площадь отдельно взятого электрода уменьшается, что приводит к снижению локальной амплитуды деформации подложки корректора.

Необходимо произвести теоретические оценки по выбору основных параметров зеркала, таких как: толщина и диаметр пассивной подложки, площадь управляющих элементов, диапазон управляющих напряжений.

Кривизна зеркальной поверхности полупассивного биморфного деформируемого зеркала зависит от различных параметров компонентов зеркала и величины прикладываемого электрического поля и определяется следующим уравнением [42]:

$$\rho_{semi} = \frac{1}{R} = \left( \frac{d_{31} E_{max}}{t_1} \right) \times \frac{6kr(1+r)}{1+k^2r^4+2kr(2+3r+2r^2)} \quad (14)$$

где  $E_{max} = V_{max}/t_1$  - прикладываемое электрическое поле (В/м);  $V_{max}$  - максимальное прикладываемое напряжение (В);  $r=t_2/t_1$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  толщины пьезокерамического диска и подложки соответственно (м);  $k = E_2/E_1$ ;  $E_1$ ,  $E_2$  - модули Юнга (модули упругости) для пьезокерамики и материала подложки (Н/м<sup>2</sup>).

Коэффициент Пуассона рассматривается равным для обоих материалов. Данное выражение позволяет получить кривизну поверхности биморфного зеркала в зависимости от изменения толщины подложки и пьезокерамического диска.

Также при производстве биморфного корректора необходимо выбрать подходящий материал подложки. Известно, что разница в коэффициентах теплового расширения материалов при нагреве ведет к возникновению внутренних механических напряжений внутри зеркала и вызывает дополнительные начальные aberrации корректора. Поэтому, основным критерием выбора материала подложки является соотношение КТР используемых материалов, а также значение пьезоэлектрического коэффициента  $d_{31}$ . Соответственно, стоит учитывать КТР выбранной пьезокерамики ( $\sim 3-5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ), который должен быть по возможности близок к КТР подложки. Самым удачным выбором с этой точки зрения является использование монокристаллического кремния.

В таблице 3 приведены параметры оптических материалов, которые обычно применяются при производстве биморфных зеркал [43].

В качестве ширины изолирующих дорожек была выбрана величина 300 мкм. Экспериментально при помощи двух последовательно подключенных линейных источников питания GW Instek gpr-30h10d было выявлено, что максимальное значение напряжения пробоя составляет 510 В. Тем самым, было решено выбрать диапазон управляющих напряжений от -200 до +250 В.

Таблица 3

Основные параметры материалов, используемых при изготовлении биморфных деформируемых зеркал

Материал	Параметры					
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Показатель преломления	Коэффициент теплового расширения, *10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг*К)
Кварцевые стекла КУ-1, КУ-2, КВ	2,2	1,46	0,55	98	1,36	733
Оптическое стекло ЛК-5	2,27	1,4846	3,5	69	1,2	-
Пьезокерамика ЦТС	-	-	3-5	46-100	1,4	400
Монокристаллический кремний	-	3,3	2,54	126-131	150	700
Медь	-	-	15,9	129,5	401	385

Параметры для расчета величины кривизны зеркала представлены в таблице 4. Для разработки биморфного деформируемого зеркала были выбраны пьезокерамика марки ЦТС-19 и поликристаллический кремний для изготовления пассивной подложки. Зависимость величины кривизны в выражении (14) от толщины использованных материалов изображена на рисунке 4 (граница оптимальных значений показана желтой линией). Очевидно, что величина кривизны поверхности корректора в значительной степени зависит от толщины пассивной подложки, чем пьезопластины. Тем самым, помимо увеличения площади электродов можно снизить толщину пассивной подложки.

Таблица 4

Основные параметры для оптимизации полупассивного биморфного деформируемого корректора волнового фронта

Параметр	Значение
$V_{max}$	450 В
$t_1$	от 0,1 до 0,6 мм
$t_2$	от 1 до 3 мм
$E_1$ (ЦТС-19)	10 <sup>10</sup> Па
$E_2$ (кремний)	6,7*10 <sup>10</sup> Па
$d_{31}$	-370*10 <sup>-12</sup>   Кл/Н

Анализ графической зависимости, представленной на рисунке 4, позволяет сделать вывод, что, варьируя толщину пьезокерамического диска и подложки, можно найти диапазон деформации поверхности зеркала, величина которой, должна составлять около 1,85 мкм. Для получения такой амплитуды толщина подложки составит 1,3 мм, а толщина пьезокерамической пластины - 0,2 мм. Управляющее напряжение в данном случае будет лежать в диапазоне от -200 до +250 В. Количество управляющих элементов должно быть не менее 57. При этом площадь электрода должна составить 20 мм<sup>2</sup>.

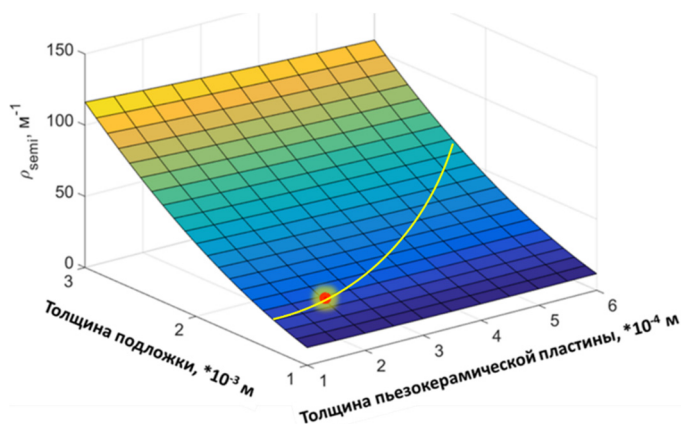


Рис. 4. График зависимости кривизны зеркальной поверхности биморфного деформируемого зеркала от толщины пьезокерамического диска  $t_1$  и толщины зеркальной подложки  $t_2$

Для радиально-кольцевой геометрии расположения электродов самым близким является конфигурация с 61 электродом. Данное количество с учётом локальной деформации отражающей поверхности укладывается на апертуру 40 мм.

Таким образом, можно вычислить значение частоты первого резонанса. Для биморфного корректора волнового фронта величина частоты первого резонанса  $f$  описывается формулой [44, 45]:

$$f = K \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Dg}{\rho r^4}} \quad (15)$$

где  $D$  – коэффициент эффективной эластичности ( $D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}$ ,  $E$  – модуль Юнга ( $\text{Н/м}^2$ ),  $H$  – толщина пластины (м),  $\nu$  – коэффициент Пуассона),  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения ( $\text{м/с}^2$ );  $r$  – радиус деформируемого зеркала (м);  $\rho = g \sum \rho_k H_k$  – удельная нагрузка на единицу площади пластины толщиной  $H$  (м) и плотностью  $\rho$  ( $\text{кг/м}^3$ ),  $\text{кг/м}\cdot\text{с}^2$ ;  $K$  – константа, зависящая от граничных условий закрепления зеркала в оправе (табл. 5).

Таблица 5

Параметры константы  $K$  в зависимости от граничных условий закрепления зеркала в оправе (рис. 5)

Граничные условия	$K$
Свободно опертые края	4,99
Свободные края	5,25
Зажатые края	10,2

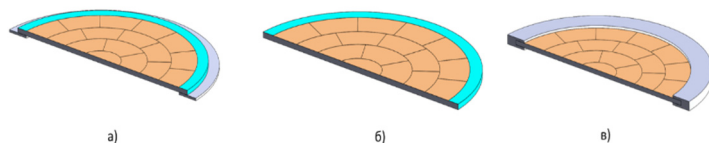


Рис. 5. Виды закрепления зеркала в оправе: а) свободно опертые края, б) свободные края, в) зажатые края

Если рассматривать зеркало с перечисленными характеристиками зажатым в оправе по краям, то оценочная частота первого резонанса составит около 3,3 кГц при радиусе зеркала 20 мм.

Основные параметры биморфного корректора волнового фронта, для компенсации искажений атмосферной турбулентности со структурной постоянной показателя преломления  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ , радиусом когерентности и скоростью сноса воздушной массы на трассе в 500 метров лазерного пучка диаметром 300 мм с длиной волны в 1064 нм представлены в таблице 6.

Таблица 6

Основные параметры биморфного деформируемого зеркала

Параметр	Значение
Толщина подложки	1,3 мм
Толщина пьезопластины	0,2 мм
Локальная деформация отражающей поверхности	1,85 мкм
Диаметр отражающей подложки	40 мм
Частота первого резонанса	3,3 кГц
Количество электродов деформируемого зеркала	61

### Заключение

В работе проанализированы ключевые параметры атмосферной турбулентности, влияющие на пространственно-угловую структуру лазерного пучка, используемого для создания оптических систем связи, такие как структурная постоянная показателя преломления, радиус когерентности и частота Гринвуда.

Были произведены оценки по определению параметров биморфных корректоров волнового фронта таких как частота первого резонанса и локальная амплитуда деформации поверхности зеркала. В качестве критерия качества эффективности коррекции aberrаций волнового фронта было выбрано значение числа Штреля на основе критерия Марешаля.

На основе графоаналитической оценки было показано, что оптимальными значениями для коррекции aberrаций волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося в атмосферной турбулентности в городских условиях, представленных в таблице 2, необходимая толщина подложки из кремния составляет 1,3 мм, так как возникает необходимость в коррекции мощного лазерного излучения. При этом толщина пьезокерамического диска составит 0,2 мм для коррекции фазовых флуктуаций, возникающих на оптической трассе, с общей амплитудой не менее  $\pm 1,85$  мкм с использованием напряжений в диапазоне от -200 до +250 В. Количество управляющих элементов в данном случае составит 61 электрод для обеспечения коррекции пространственной составляющей спектра атмосферной турбулентности.

Временная составляющая спектра aberrаций для скорости ветра 5 м/с и радиуса когерентности 52 мм частота Гринвуда составит около 41 Гц. Поэтому частота коррекции подобных aberrаций в адаптивной оптической системе должна быть не менее 70 Гц. Частота работы системы в данном случае должна быть не менее 700 Гц, что может быть получено при оценочной частоте первого резонанса зеркала 3,3 кГц при радиусе зеркала 20 мм.

## Литература

1. *Nguyen M.T., Mai V., Kim H.* Time-Efficient Simulation of Free-Space Optical Communication Systems Under Atmospheric Turbulence, Pointing Error, and Angle-of-Arrival Fluctuations // *IEEE Photonics Journal*. 2023. Vol. 15. No.6. Pp. 1-9. Art no. 7304709. doi: 10.1109/JPHOT.2023.3322159.
2. *Павлов И.И., Мышкин В. Ф., Хан В.А.* Организация подводной беспроводной системы связи // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Т. 18. №1. С. 4-12. doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-4-12.
3. *Morita R., Ishimura S., Inoue T., Nishimura K., Takahashi H., Tsuritani T., De Zoysa M., Ishizaki K., Suzuki M., Noda S.* High-speed high-power free-space optical communication via directly modulated watt-class photonic-crystal surface-emitting lasers // *Optica*. 2024. Vol. 11. Pp. 971-979. doi:10.1364/OPTICA.523421.
4. *Жук А.П., Осипов Д.Л., Гавришев А.А., Бурмистров В.А.* Анализ методов защиты от несанкционированного доступа беспроводных каналов связи робототехнических систем // *Научные технологии в космических исследованиях земли*. 2016. Т. 8. № 2. С. 38-42.
5. *Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Бурдин А.В.* Перспективы применения атмосферной оптической связи на крупных промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19. №1. С. 21-30. doi: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30.
6. *Li J., Carlson B.E., Yung Y.L.* Scattering and absorbing aerosols in the climate system // *Nat. Rev. Earth Environ*. 2022. Vol. 3. Pp. 363-379. doi:10.1038/s43017-022-00296-7.
7. *Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* Atmospheric turbulence generator: software and hardware implementation of Kolmogorov phase screen simulation system // *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 128710. Art. no. 12871K. doi: 10.1117/12.3014325.
8. *Абрамова Е.С., Адамов Е.В., Аксенов В.П., Богач Е.А., Дудоров В.В., Колосов В.В., Левицкий М.Е., Погуца Ч.Е., Павлов И.И.* Формирование криптографического ключа в сопряженных приемо-передающих атмосферных лазерных системах // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Том 17. №2. С. 33-41. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-33-41.
9. *Wang F., Du W., Yuan Q., Liu D., Feng S.* A Survey of Structure of Atmospheric Turbulence in Atmosphere and Related Turbulent Effects // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. Art. no. 1608. doi: 10.3390/atmos12121608.
10. *Аджемов С.А., Васильев А.П.* Эффективный выбор основания кода при первичном кодировании // 2023. *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. Т. 17. № 6. С. 29-36. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-6-29-36.
11. *Журавлёв А.П., Рюмиин К. Ю., Атакищев О.И., Тутенко Е.А., Тутенко М.А.* Параметры модуляции современных систем связи // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Том 17. №7. С. 13-20. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-13-20.
12. *Zhou H., Su X., Duan Y., Zuo Y., Jiang Z., Ramakrishnan M., Teppe J., Ziegler V., Boyd R.W., Tur M., Willner A.E.* Automatic mitigation of dynamic atmospheric turbulence using optical phase conjugation for coherent free-space optical communications // *Optica*. 2025. Vol. 12. Pp. 158-167. doi:10.1364/OPTICA.541823.
13. *Toporovsky V., Galaktionov I., Nikitin A., Samarkin V., Kuzmitsky P., Kudryashov A.* Dual-loop adaptive optical system for compensation of the low- and high-order wavefront aberrations // *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 13130. Art. no. 131300I. doi: 10.1117/12.3028589.
14. *Nafria V., Djordjevic I.B.* Entanglement assisted free-space optical communication with two-pump-based entanglement generation outperforming classical laser communication in strong turbulence regime at 10 Gb/s // *Opt. Express*. 2024. Vol. 32. Pp. 47908-47919. doi:10.1364/OE.544674.
15. *Scarfe L., Hufnagel F., Ferrer-Garcia M.F.* Fast adaptive optics for high-dimensional quantum communications in turbulent channels // *Commun. Phys*. 2025. Vol. 8. Art. no. 79. doi:10.1038/s42005-025-01986-6.
16. *Stotts Larry B., Andrews L.C.* Adaptive optics model characterizing turbulence mitigation for free space optical communications link budgets // *Opt. Express*. 2021. Vol. 29. Pp. 20307-20321. doi:10.1364/OE.430554.
17. *Horst Y., Bitachon B.I., Kulmer L.* Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics // *Light Sci. Appl*. 2023. Vol. 12. Art. no. 153. doi:10.1038/s41377-023-01201-7.
18. *Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Panich A., Sokallo A., Malykhin A., Sheldakova J.* Robust stack-array deformable mirror for laser beam control // *Proc. SPIE*. 2022. Vol. 11987. Pp. 119870M. doi: 10.1117/12.2614509.
19. *Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* Wide-aperture multichannel Shack-Hartmann sensor for multispectral wavefront measurements // *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 12871. Art. no. 128710L. doi: 10.1117/12.3014349.
20. *Rodríguez Ramos L.F., Díaz García J.J., Fernández Valdivia J.J., Chulani H.M., Colodro Conde C., Rodríguez Ramos J.M.* The use of CPU, GPU and FPGA in real-time control of adaptive optics systems // *Proc. of Conference of Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*. 2015. Vol.1 No. 1. doi:10.20353/K3T4CP1131563.
21. *Varkentina N., Dovillaire G., Legrand J., Beaugrand G., Stefanon I., Treimany P., Levecq X.* New adaptive optics control strategy for petawatt-class laser chains // *Quantum Electronics*. 2017. Vol. 47. No. 8. Pp. 711-717. doi: 10.1070/QEL16429.
22. *Shi W., He Y., Wang J., Zhou L., Chen J., Zhou L., Xi Z., Wang Z., Fang K., Li Y.* Aberration correction for deformable-mirror-based remote focusing enables high-accuracy whole-cell super-resolution imaging // *Photon. Res*. 2024. Vol. 12. Pp. 821-832. doi:10.1364/PRJ.514414.
23. *Böttner P., Peschel T., Brady A., Heinig D., Goy M., Eberhardt R., Nolte S.* Design of a metal-based deformable mirror for orthogonal beam deflection and highly dynamic beam oscillation // *Opt. Express*. 2022. Vol. 30. Pp. 45178-45194. doi:10.1364/OE.457364.
24. *Yang H., Tang L., Yan Z., Chen P., Yang W., Li X., Ge Y.* Wavefront Correction for Extended Sources Imaging Based on a 97-Element MEMS Deformable Mirror // *Micromachines*. 2025. Vol. 16. Art. no. 50. doi:10.3390/mi16010050.
25. *Biasi R., Gallieni D., Salinari P., Riccardi A., Mantegazza P.* Contactless thin adaptive mirror technology: past, present, and future // *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7736. Pp. 77362B. doi:10.1117/12.858816.
26. *O'Toole S., Zerulla D.* Active lens and mirror technology through tailored thermal expansion // *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 12998. Art. no. 129980D. doi:10.1117/12.3016244.
27. *Toporovsky V., Galaktionov I., Samarkin V., Kudryashov A., Panich A., Malykhin A., Laskin A.V.* Wavefront control with high-spatial cartridge-type piezostack deformable mirror // *Proc. SPIE*. 2023. Vol. 12667. Art. no. 126670L. doi: 10.1117/12.2676879.
28. *Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* Piezoelectric bimorph mirrors with various number of electrodes for scattered laser beam focusing // *Proc. SPIE*. Vol. 12341. Art. no. 123411T. doi: 10.1117/12.2645061.
29. *Tyson R.K.* Principles of adaptive optics. Boca Raton, CRC Press, 2022. 356 p.
30. *Hardy J.W.* Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. New York: Oxford University Press, Inc., 1998. 448 p.
31. *Sauvage J., Fusco T., Rousset G., Petit C.* Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics // *Journal of the Optical Society of America A*. 2007. Vol. 24. Pp. 2334-2346. doi: doi.org/10.1364/JOSAA.24.002334.
32. *Hamelinck R.* Adaptive deformable mirror: based on electromagnetic actuators. Ph.D. Thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2010. 227 p.
33. *Noll R.* Zernike polynomials and atmospheric turbulence // *Journal of the Optical Society of America*. 1976. Vol. 66. Pp. 207-211. doi: doi.org/10.1364/JOSA.66.000207.
34. *Saint-Jacques D., Baldwin J.E.* Taylor's hypothesis: good for // *Proc. of SPIE*. 2000. Vol. 4006. Pp. 951-962. doi:10.1117/12.390175.

35. *Buscher D.* A Thousand and One Nights of Seeing on Mt. Wilson // Proc. of SPIE. 1994. Vol. 2200. Pp. 260–271. doi:10.1117/12.177276.
36. *Greenwood D.* Bandwidth specification for adaptive optics systems // Journal of the Optical Society of America. 1977. Vol. 67. Pp. 390–393. doi:10.1364/JOSA.67.000390.
37. *Tyler G.A.* Bandwidth considerations for tracking through turbulence // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. Vol. 11. Pp. 358–367. doi:10.1364/JOSAA.11.000358.
38. *Rukosuev A.L., Kudryashov A.V., Lylova A.N., Samarkin V.V., Sheldakova Yu.V.* Adaptive optical system for real-time wavefront correction // Atmospheric and oceanic optics. 2015. Vol. 28. No. 4. Pp. 381–386. doi: 10.1134/S1024856015040119.
39. *Rukosuev A., Nikitin A., Toporovsky V., Sheldakova J., Kudryashov A.* Real-Time Correction of a Laser Beam Wavefront Distorted by an Artificial Turbulent Heated Airflow // Photonics. 2022. Vol. 9. Art. no. 351. doi: 10.3390/photonics9050351.
40. *Kokorowski S.* Analysis of adaptive optical elements made from piezoelectric bimorphs // J. Opt. Soc. Am. 1979. Vol. 69. Pp. 181–187. doi: 10.1364/JOSA.69.000181.
41. *Rupitsch S.J.* Piezoelectric Sensors and Actuators: Fundamentals and Applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2019. 559 p.
42. *Ellis E.M.* Low-cost bimorph mirrors in adaptive optics. Ph.D. Thesis. IPL, 1999. 170 p.
43. *Samarkin V., Aleksandrov A., Dubikovskiy V., Kudryashov A.* Water-cooled bimorph correctors // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 6018. Pp. 60180Z–60180Z-5. doi: 10.1117/12.669365.
44. *Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S.* Theory of plates and shells. McGraw-Hill New York, 1959. 872 p.
45. *Young W.C., Budynas R.G., Sadegh A.M.* Roark's Formulas for Stress and Strain, 8th Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012. 1072 p.

## ANALYSIS OF BIMORPH WAVEFRONT CORRECTOR FOR FREE-SPACE COMMUNICATION APPLICATION

**Vladimir V. Toporovsky**, *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics (IDG RAS), Moscow, Russia;*  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [toporovskii\\_v@mail.ru](mailto:toporovskii_v@mail.ru)*

**Ilya V. Galaktionov**, *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics (IDG RAS), Moscow, Russia;*  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [ilya.galaktionoff@gmail.com](mailto:ilya.galaktionoff@gmail.com)*

### Abstract

The widespread use of adaptive optical systems to suppress the negative effects of atmospheric turbulence in laser optical communication tasks leads to modernization and expansion of the element base. To correct for laser radiation phase aberrations the development of bimorph deformable mirror with optimized parameters (first resonance frequency, amplitude of deformation of the reflecting surface) is necessary. The research objective is to find the optimal parameters of the first resonance frequency and local stroke for bimorph piezoelectric mirrors depending on the values of the structural constant of the refractive index, the coherence radius and the wind speed on atmospheric optical paths. The solution to the problem of finding the optimal values of the deformable mirror is estimated by the value of the Strehl ratio through the analysis of the value of the root-mean-square error of the aperture correction. The definition is based on the assumption that the major part of the total error is spent on the fit error, the occurrence of which depends on the insufficient number of degrees of freedom of the control elements of the deformable mirror, and, accordingly, the limited level of compensated spatial frequencies that it can correct; in addition, due to the magnitude of the temporal error, which imposes restrictions on the width of the control band of the entire adaptive optics system. For known atmospheric parameters, the distance between the control elements and the required width of the control band can be calculated and the desired Strehl ratio can be obtained. Optimization of the mirror parameters was performed for typical parameters of atmospheric turbulence in urban conditions, taking into account a path of 500 meters, a laser beam of 300 mm diameter,  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , a coherence radius of 52 mm, a wavelength of 1064 nm and a wind speed of 5 m/s. The mirror parameters were the materials of the mirror components, the radii and thicknesses of the passive substrate and piezoelectric plate, and the range of control voltages. It was determined that the thickness of the silicon substrate should be 1.3 mm, and the piezodisk 0.2 mm, in order to correct phase fluctuations with an amplitude of at least  $\pm 1.85 \text{ ?m}$  at a control voltage in the range from -200 to +250 V. The radius of the mirror should be 20 mm, which will increase the frequency of the first resonance of the mirror and make it possible to correct rapidly changing wavefront aberrations. Correction of large- and small-scale aberrations of continuous laser radiation using a bimorph deformable mirror with improved characteristics improves the quality of laser radiation transmission along the optical path. Discussion: the presented technique for analyzing the parameters of a bimorph deformable mirror will allow a theoretical assessment of the efficiency of adaptive optical systems under various atmospheric conditions in terms of correcting the spatial and temporal characteristics of the Kolmogorov spectrum turbulence.

**Keywords:** *atmospheric turbulence, adaptive optics, bimorph deformable mirror, laser radiation transferring, free-space optical communication, Strehl ratio*

## References

- [1] M.T. Nguyen, V. Mai, H. Kim, "Time-Efficient Simulation of Free-Space Optical Communication Systems Under Atmospheric Turbulence, Pointing Error, and Angle-of-Arrival Fluctuations," *IEEE Photonics Journal*. 2023. Vol. 15. No.6. Pp. 1-9. Art no. 7304709. doi: 10.1109/JPHOT.2023.3322159.
- [2] I.I. Pavlov, V.F. Myshkin, V.A. Khan, "Organization of an underwater wireless communication system," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No.1. Pp. 4-12. (in Russian). doi: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-4-12.
- [3] R. Morita, S. Ishimura, T. Inoue, K. Nishimura, H. Takahashi, T. Tsuritani, M. De Zoysa, K. Ishizaki, M. Suzuki, S. Noda, "High-speed high-power free-space optical communication via directly modulated watt-class photonic-crystal surface-emitting lasers," *Optica*. 2024. Vol. 11. Pp. 971-979. doi:10.1364/OPTICA.523421.
- [4] A.P. Zhuk, D.L. Osipov, A.A. Gavrishchev, V.A. Burmistrov, "Analysis methods of protection against unauthorized access wirelessly robotic systems," *H&ES Research*. 2016. Vol. 8. No. 2. Pp. 38-42. (in Russian)
- [5] S.Yu. Kazantsev, M.V. Sapozhnikov, Yu.B. Mironov, D.N. Terekhin, A.V. Burdin "Prospects for the application of atmospheric optical communications in large industrial and energy complexes of the Russian Federation," *T-Comm*, 2025. Vol. 19. No.1. Pp. 21-30. (in Russian). doi: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30.
- [6] J. Li, B.E. Carlson, Y.L. Yung, "Scattering and absorbing aerosols in the climate system," *Nat. Rev. Earth Environ*. 2022. Vol. 3. Pp. 363-379. doi:10.1038/s43017-022-00296-7.
- [7] I. Galaktionov, J. Sheldakova, V. Toporovsky, A. Kudryashov, "Atmospheric turbulence generator: software and hardware implementation of Kolmogorov phase screen simulation system," *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 128710. Art. no. 12871K. doi: 10.1117/12.3014325.
- [8] E.S. Abramova, E.V. Adamov, V.P. Aksenov, E.A. Bogach, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky, C.E. Pogutsa, I.I. Pavlov, "Cryptographic key formation in coupled transmit-receiving atmospheric laser systems," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No.2. Pp. 33-41. (in Russian). doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-33-41.
- [9] F. Wang, W. Du, Q. Yuan, D. Liu, S. Feng, "A Survey of Structure of Atmospheric Turbulence in Atmosphere and Related Turbulent Effects," *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. Art. no. 1608. doi: 10.3390/atmos12121608.
- [10] S.A. Adzhemov, A.P. Vasiliev, "Efficient code choice base in primary coding," *T-Comm*, vol. 17, no.6. Pp. 29-36. (in Russian). doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-6-29-36.
- [11] A.P. Zhuravlev, K.Yu. Ryumshin, O.I. Atakischev, E.A. Titenko, M.A. Titenko, "A Modulation parameters of new communication systems," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No.7. Pp. 13-20. (in Russian). doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-13-20.
- [12] H. Zhou, X. Su, Y. Duan, Y. Zuo, Z. Jiang, M. Ramakrishnan, J. Tepper, V. Ziegler, R.W. Boyd, M. Tur, A.E. Willner, "Automatic mitigation of dynamic atmospheric turbulence using optical phase conjugation for coherent free-space optical communications," *Optica*. 2025. Vol. 12. Pp. 158-167. doi:10.1364/OPTICA.541823.
- [13] V. Toporovsky, I. Galaktionov, A. Nikitin, V. Samarkin, P. Kuzmitsky, A. Kudryashov, "Dual-loop adaptive optical system for compensation of the low- and high-order wavefront aberrations," *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 13130. Art. no. 131300I. doi: 10.1117/12.3028589.
- [14] V. Nafria, I.B. Djordjevic, "Entanglement assisted free-space optical communication with two-pump-based entanglement generation outperforming classical laser communication in strong turbulence regime at 10 Gb/s," *Opt. Express*. 2024. Vol. 32. Pp. 47908-47919. doi:10.1364/OE.544674.
- [15] L. Scarfe, F. Hufnagel, M.F. Ferrer-Garcia, "Fast adaptive optics for high-dimensional quantum communications in turbulent channels," *Commun. Phys*. 2025. Vol. 8. Art. no. 79. doi:10.1038/s42005-025-01986-6.
- [16] B. Stotts Larry, L.C. Andrews, "Adaptive optics model characterizing turbulence mitigation for free space optical communications link budgets," *Opt. Express*. 2021. Vol. 29. Pp. 20307-20321. doi:10.1364/OE.430554.
- [17] Y. Horst, B.I. Bitachon, L. Kulmer, "Tbit/s line-rate satellite feeder links enabled by coherent modulation and full-adaptive optics," *Light Sci. Appl*. 2023. Vol. 12. Art. no. 153. doi:10.1038/s41377-023-01201-7.
- [18] V. Toporovsky, V. Samarkin, A. Kudryashov, A. Panic, A. Sokallo, A. Malykhin, J. Sheldakova, "Robust stack-array deformable mirror for laser beam control," *Proc. SPIE*. 2022. Vol. 11987. Pp. 119870M. doi: 10.1117/12.2614509.
- [19] I. Galaktionov, A. Nikitin, J. Sheldakova, V. Toporovsky, A. Kudryashov, "Wide-aperture multichannel Shack-Hartmann sensor for multi-spectral wavefront measurements," *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 12871. Art. no. 128710L. doi: 10.1117/12.3014349.
- [20] L.F. Rodriguez Ramos, J.J. Diaz Garcia, J.J. Fernandez Valdivia, H.M. Chulani, C. Colodro Conde, J.M. Rodriguez Ramos, "The use of CPU, GPU and FPGA in real-time control of adaptive optics systems," *Proc. of Conference of Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*. 2015. Vol.1 No. 1. doi:10.20353/K3T4CPI131563.
- [21] N. Varkentina, G. Dovillaire, J. Legrand, G. Beaugrand, I. Stefanon, P. Treimany, X. Levecq, "New adaptive optics control strategy for petawatt-class laser chains," *Quantum Electronics*. 2017. Vol. 47. No. 8. Pp. 711-717. doi: 10.1070/QEL16429.
- [22] W. Shi, Y. He, J. Wang, L. Zhou, J. Chen, L. Zhou, Z. Xi, Z. Wang, K. Fang, Y. Li, "Aberration correction for deformable-mirror-based remote focusing enables high-accuracy whole-cell super-resolution imaging," *Photon. Res*. 2024. Vol. 12. Pp. 821-832. doi:10.1364/PRJ.514414.
- [23] P. Bottner, T. Peschel, A. Brady, D. Heinig, M. Goy, R. Eberhardt, S. Nolte, "Design of a metal-based deformable mirror for orthogonal beam deflection and highly dynamic beam oscillation," *Opt. Express*. 2022. Vol. 30. Pp. 45178-45194. doi:10.1364/OE.457364.

- [24] H. Yang, L. Tang, Z. Yan, P. Chen, W. Yang, X. Li, Y. Ge, "Wavefront Correction for Extended Sources Imaging Based on a 97-Element MEMS Deformable Mirror," *Micromachines*. 2025. Vol. 16. Art. no. 50. doi:10.3390/mi16010050.
- [25] R. Biasi, D. Gallieni, P. Salinari, A. Riccardi, P. Mantegazza, "Contactless thin adaptive mirror technology: past, present, and future," *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7736. Pp. 77362B. doi:10.1117/12.858816.
- [26] S. O'Toole, D. Zerulla, "Active lens and mirror technology through tailored thermal expansion," *Proc. SPIE*. 2024. Vol. 12998. Art. no. 129980D. doi:10.1117/12.3016244.
- [27] V. Toporovsky, I. Galaktionov, V. Samarkin, A. Kudryashov, A. Panich, A. Malykhin, A.V. Laskin, "Wavefront control with high-spatial cartridge-type piezostack deformable mirror," *Proc. SPIE*. 2023. Vol. 12667. Art. no. 126670L. doi: 10.1117/12.2676879.
- [28] I. Galaktionov, J. Sheldakova, V. Toporovsky, A. Kudryashov, "Piezoelectric bimorph mirrors with various number of electrodes for scattered laser beam focusing," *Proc. SPIE*. Vol. 12341. Art. no. 123411T. doi: 10.1117/12.2645061.
- [29] R.K. Tyson, "Principles of adaptive optics," Boca Raton, CRC Press, 2022. 356 p.
- [30] J.W. Hardy, "Adaptive Optics for Astronomical Telescopes," New York: Oxford University Press, Inc., 1998. 448 p.
- [31] J. Sauvage, T. Fusco, G. Rousset, C. Petit, "Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics," *Journal of the Optical Society of America A*. 2007. Vol. 24. Pp. 2334-2346. doi: doi.org/10.1364/JOSAA.24.002334.
- [32] R. Hamelinck, "Adaptive deformable mirror: based on electromagnetic actuators," Ph.D. Thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2010. 227 p.
- [33] R. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," *Journal of the Optical Society of America*. 1976. Vol. 66. Pp. 207-211. doi: doi.org/10.1364/JOSA.66.000207.
- [34] D. Saint-Jacques, J.E. Baldwin, "Taylor's hypothesis: good for," *Proc. of SPIE*. 2000. Vol. 4006. Pp. 951-962. doi:10.1117/12.390175.
- [35] D. Buscher, "A Thousand and One Nights of Seeing on Mt. Wilson," *Proc. of SPIE*. 1994. Vol. 2200. Pp. 260-271. doi:10.1117/12.177276.
- [36] D. Greenwood, "Bandwidth specification for adaptive optics systems," *Journal of the Optical Society of America*. 1977. Vol. 67. Pp. 390-393. doi:10.1364/JOSA.67.000390.
- [37] G.A. Tyler, "Bandwidth considerations for tracking through turbulence," *J. Opt. Soc. Am. A*. 1994. Vol. 11. Pp. 358-367. doi: 10.1364/JOSAA.11.000358.
- [38] A.L. Rukosuev, A.V. Kudryashov, A.N. Lylova, V.V. Samarkin, Yu.V. Sheldakova, "Adaptive optical system for real-time wavefront correction," *Atmospheric and oceanic optics*. 2015. Vol. 28. No. 4. Pp. 381-386. doi: 10.1134/S1024856015040119.
- [39] A. Rukosuev, A. Nikitin, V. Toporovsky, J. Sheldakova, A. Kudryashov, "Real-Time Correction of a Laser Beam Wavefront Distorted by an Artificial Turbulent Heated Airflow," *Photonics*. 2022. Vol. 9. Art. no. 351. doi: 10.3390/photonics9050351.
- [40] S. Kokorowski, "Analysis of adaptive optical elements made from piezoelectric bimorphs," *J. Opt. Soc. Am.* 1979. Vol. 69. Pp. 181-187. doi: 10.1364/JOSA.69.000181.
- [41] S.J. Rupitsch, "Piezoelectric Sensors and Actuators: Fundamentals and Applications," Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2019. 559 p.
- [42] E.M. Ellis Low-cost bimorph mirrors in adaptive optics," Ph.D. Thesis. IPL, 1999. 170 p.
- [43] V. Samarkin, A. Aleksandrov, V. Dubikovskiy, A. Kudryashov, "Water-cooled bimorph correctors," *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 6018. Pp. 60180Z-60180Z-5. doi: 10.1117/12.669365.
- [44] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, "Theory of plates and shells," McGraw-Hill New York, 1959. 872 p.
- [45] W.C. Young, R.G. Budynas, A.M. Sadegh, "Roark's Formulas for Stress and Strain," 8th Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012. 1072 p.

#### Information about authors:

**Vladimir V. Toporovsky**, Research Assistant, Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics (IDG RAS), Moscow, Russia; Engineer of Quantum Center, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

**Ilya V. Galaktionov**, PhD of Physics and Mathematics, Research Assistant, Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics (IDG RAS), Moscow, Russia; Engineer, Quantum Center of Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia