

## Особенности адаптивной фазовой коррекции искажений оптических волн в условиях проявления флуктуаций интенсивности

Н.Н. Ботыгина<sup>1</sup>, О.Н. Емалеев<sup>1</sup>, В.В. Лавринов<sup>1</sup>, В.П. Лукин<sup>1</sup>, А.А. Селин<sup>1</sup>,  
Е.Л. Соин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. акад. Зуева 1, Томск, Россия, 634055

**Аннотация.** Впервые экспериментально объяснена причина потери эффективности адаптивной фазовой коррекции при распространении оптических волн в турбулентной атмосфере в условиях сильных флуктуаций интенсивности. По данным экспериментов, выполненных, как на горизонтальных, так и на вертикальных атмосферных трассах, было обнаружено, что, когда радиус когерентности в оптической волне становится меньше первой зоны Френеля, флуктуации интенсивности начинают влиять на данные фазовых измерений. Это приводит к тому, что основной измеритель системы АО – датчик Гартмана - при наличии глубокой амплитудной модуляции уже не обеспечивает правильность измерений распределения фазы. На основе изучения поведения модовых составляющих фазовых флуктуаций, восстановленных по данным измерений при различных режимах работы, было обнаружено, что, в первую очередь, подвергаются искажениям низшие моды разложения фазовых флуктуаций - наклоны, дефокусировка и астигматизм, и как показывает анализ эти моды сильно отличаются от классических, соответствующих режиму слабых флуктуаций.

### 1. Введение

При анализе эффективности фазовых систем коррекции обычно полагается, что флуктуации интенсивности отсутствуют. Интересно рассмотреть другой предельный случай – случай сильных флуктуаций интенсивности, предполагая, что адаптивная система имеет неограниченное пространственно-временное разрешение в отношении коррекции фазовых искажений.

Известно, что фазовые искажения, приобретаемые при прохождении через оптически неоднородную среду, по мере дальнейшего распространения волны трансформируются в модуляцию пространственного распределения интенсивности. При достаточно глубокой модуляции могут возникнуть точки с нулевой интенсивностью. Если описывать любую оптическую волну в терминах комплексной амплитуды  $U$ , то такие точки образуются в местах пересечения (или касания) линий, где ее вещественная и мнимая части равны нулю. Если  $\text{Re}U$  и  $\text{Im}U$  при переходе через эти линии меняют знак с положительного на отрицательный, то такие точки пересечения являются точками дислокаций волнового фронта. С точки зрения адаптивной фазовой коррекции важно то, что при появлении дислокаций нарушается непрерывность двумерного распределения фазы [1, 2]. При появлении таких разрывов ошибка аппроксимации волнового фронта адаптивным зеркалом будет значительно увеличиваться.

Применение специальных корректоров в общем случае также не даст эффекта, поскольку при коррекции турбулентных искажений дислокации возникают в случайно расположенных точках апертуры. Алгоритмы построения карты aberrаций опорной волны, используемые сегодня в большинстве датчиков волнового фронта, дают на выходе непрерывную функцию поперечных координат. Фактически они фильтруют вихревую часть вектора измерений.

## 2. Численные эксперименты

Рассмотрим результаты [2-7] численных экспериментов, показывающих влияние флуктуаций интенсивности и дислокаций на коррекцию турбулентных искажений. Практический и научный интерес представляют два аспекта. Первый – насколько значительно потеря амплитудной информации влияет на эффективность фазовой коррекции. Второй – как сильно потеря информации, заключенная в вихревой части фазовых измерений, снижает эффективность адаптации.

Численные эксперименты были проведены для двух схем коррекции. Первая – это схема компенсации искажений. Вторая схема адаптации – это схема ФС. Для каждой из двух схем было рассмотрено два варианта алгоритма измерения фазы. В первом варианте идеальная адаптивная система мгновенно и точно воспроизводит фазу опорной волны на всей плоскости поперечного сечения, включая особые точки волнового фронта (дислокации). Во втором варианте корректируется только составляющая, соответствующая потенциальной части векторного поля локальных наклонов волнового фронта. Далее будем называть такую коррекцию коррекцией «потенциальной» (или «безвихревой») фазы.

Таким образом, фактически нами реализованы четыре схемы численного эксперимента:

- 1) идеальная система компенсации,
- 2) система компенсации только «потенциальной» части aberrаций,
- 3) идеальная система ФС,
- 4) система ФС «потенциальной» части aberrаций.

При этом можно ввести четыре численных параметра задачи, которыми являются следующие величины: длина трассы распространения  $L$ , диаметр апертуры системы  $D$ , длина волны  $\lambda$ , интенсивность турбулентности  $C_n^2$ . В соответствии с теорией подобия задача распространения плоской волны в турбулентной атмосфере характеризуется только двумя масштабами: в качестве поперечного масштаба можно выбрать радиус когерентности  $r_0$ , а в качестве продольного масштаба – длину дифракции на радиусе когерентности  $L_T = kr_0^2$ . Тогда задача будет характеризоваться нормированной длиной трассы  $L/L_T$  и нормированным диаметром апертуры  $D/r_0$ . Индекс мерцания плоской волны  $\beta_0^2$  для степенного спектра турбулентности однозначно связан с отношением  $L/L_T$ :  $\beta_0^2 = 2,9(L/L_T)^{5/6}$ . Его можно использовать в качестве параметра вместо отношения  $L/L_T$ .

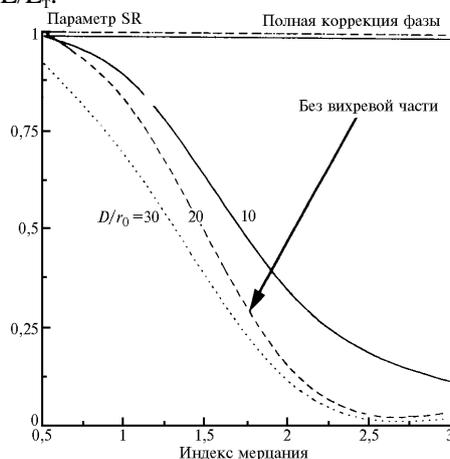


Рисунок 1. Зависимость отношения SR от индекса мерцания для каждой из схем коррекции.

Результаты проведенных нами численных экспериментов [5-7] показаны на рис. 1. На этом рисунке изображена зависимость отношения SR от индекса мерцания для каждой из схем коррекции. Нормированный диаметр апертуры принимал значения  $D/r_0 = 10, 20, 30$ . Поэтому каждой схеме соответствует семейство из трех кривых.

Для идеальной схемы компенсации отношение SR практически не зависит ни от нормированного диаметра апертуры, ни от длины трассы. Отличие значения параметра SR от дифракционно-ограниченного значения (равного 1) практически незаметно. Это согласуется с представлением о том, что основную роль в искажении изображения играют фазовые флуктуации, а роль амплитудных – незначительна. В данном случае фазовые флуктуации скорректированы полностью.

При идеальной компенсации только «безвихревой» части фазы эффективность коррекции снижается довольно значительно при увеличении индекса мерцания. Двукратное снижение значения отношения SR достигается уже при значениях  $\beta_0^2$  порядка 1–1,5. Дальнейшее увеличение флуктуаций интенсивности приводит к тому, что интенсивность в фокусе линзы стремится к нескорректированному значению. Снижение эффективности коррекции на порядок происходит при  $\beta_0^2 = 3$ , т.е. при  $L = L_T = kr_0^2$ .

Аналогичные результаты получаются и в схеме фазового сопряжения (рис. 2). Это означает, что применение такой фазовой коррекции теряет эффективность, когда длина трассы достигает длины дифракции на радиусе когерентности.

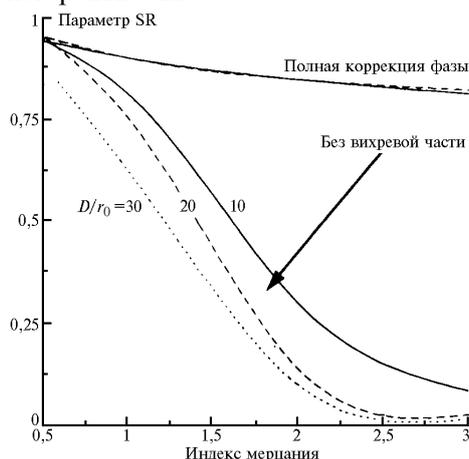


Рисунок 2. То же, что и на рис.1 в схеме фазового сопряжения.

Эффективность коррекции в схеме идеального фазового сопряжения (Рис.2) уже небезразлична к величине флуктуаций интенсивности. Однако зависимость не столь сильна, как это можно было бы ожидать. При  $\beta_0^2 = 3$  параметр SR уменьшается до значения 0,8 и практически не зависит от диаметра апертуры.

### 3. Американский эксперимент

Существуют ограниченные экспериментальные данные, с которыми можно сравнить приведенные результаты численного анализа. Так один эксперимент был проведен в Линкольнской лабораторией США на трассе протяженностью 5,5 км [8]. Адаптивная система включала гартмановский датчик и деформируемое зеркало. Использовался алгоритм фазового сопряжения для фокусированного пучка. Длина волны опорного и корректируемого пучков составляла 633 и 514 нм соответственно. По вертикальной оси отложено значения параметра Штреля для системы. По горизонтальной оси отложена дисперсия флуктуаций логарифма амплитуды  $\chi$  для сферической волны. Заметим, что дисперсия флуктуаций интенсивности в 4 раза больше  $\sigma_\chi^2$  и масштабы горизонтальных осей на рис. 1 и 2 практически совпадают.

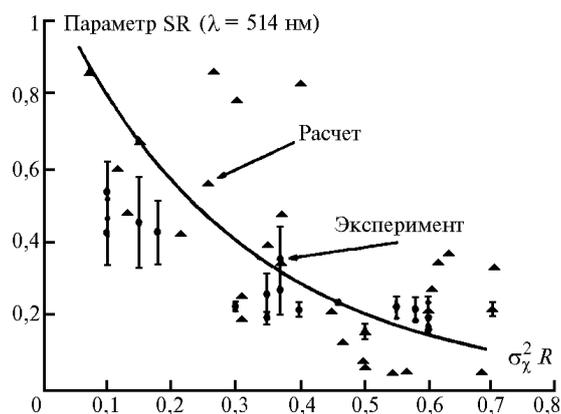


Рисунок 3. Результаты эксперимента в Ливерморской лаборатории (США).

По данным Линкольнской лаборатории трудно судить, в какой мере снижение эффективности коррекции происходит вследствие нарушения непрерывности фазы и фильтраций фазовых дислокаций, а в какой – из-за факторов: увеличения отношения диаметра апертуры к радиусу когерентности, ошибок датчика искажений волнового фронта и других ошибок адаптивной системы. Хорошее согласие с данными нашего расчета говорит о том, что именно применение алгоритма восстановления волнового фронта опорного пучка, фильтрующего «вихревую» фазу, является решающим фактором, обуславливающим снижение эффективности коррекции.

#### 4. Выводы

На основании изложенного [1-7], можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная численная модель АОС, включающая «фильтрующий» алгоритм реконструкции волнового фронта, позволяет адекватно моделировать и количественно оценивать эффективность существующей адаптивной системы в условиях сильных флуктуаций интенсивности.
2. При коррекции турбулентных искажений эффективность фазовой коррекции снижается примерно вдвое при возрастании нормированной дисперсии флуктуации интенсивности (индекса мерцания)  $\beta_0^2$  от нуля до единицы. В этом диапазоне значений  $\beta_0^2$  эффективность коррекции практически не зависит от соотношения между диаметром апертуры и радиусом когерентности. При дальнейшем возрастании флуктуаций интенсивности начинает проявляться зависимость эффективности коррекции от диаметра апертуры. Увеличение  $\beta_0^2$  до 3 приводит к падению эффективности коррекции на порядок и более, и параметр SR стремится к значению, получаемому в системе без коррекции.
3. Поскольку уровень  $\beta_0^2 = 3$  примерно соответствует границе применимости метода плавных возмущений (МПВ), то можно предположить, что и применимость МПВ связана с возникновением дислокаций. Заметим, что в точках дислокаций интенсивность равна нулю и логарифм амплитуды обращается в бесконечность, а МПВ фактически является методом возмущений для логарифма поля.
4. Снижение эффективности адаптивной коррекции «безвихревой» фазы с ростом дисперсии флуктуаций интенсивности происходит примерно одинаково как в схеме фазовой компенсации, так и в схеме фазового сопряжения. Различия между плоской волной и пучком также не существенны, что следует из сравнения с экспериментом Линкольнской лаборатории.

Интересно отметить [7], что и при больших флуктуациях амплитуды применение адаптивной фазовой коррекции все-таки обеспечивает определенный и довольно существенный выигрыш по сравнению с случаем без коррекции. Здесь сравнивается значение параметра SR. В Табл.1 приведены отношения скорректированного параметра  $SR_c$  к нескорректированному значению параметра  $SR_n$  для схемы компенсации «безвихревой» фазы при дисперсии  $\beta_0^2 = 3$ .

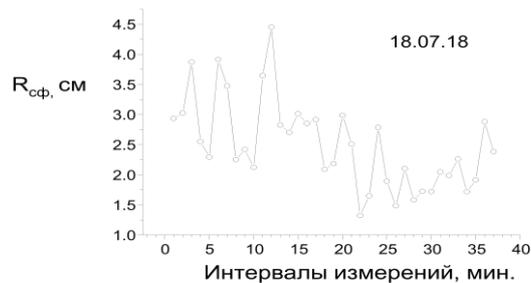
**Таблица 1.** Значение параметра Штреля.

$D/r_0$	$SR_n$	$SR_c$	$SR_c/SR_n$
10	0,0324	0,129	3,98
20	0,0106	0,038	3,58
30	0,0051	0,025	4,90

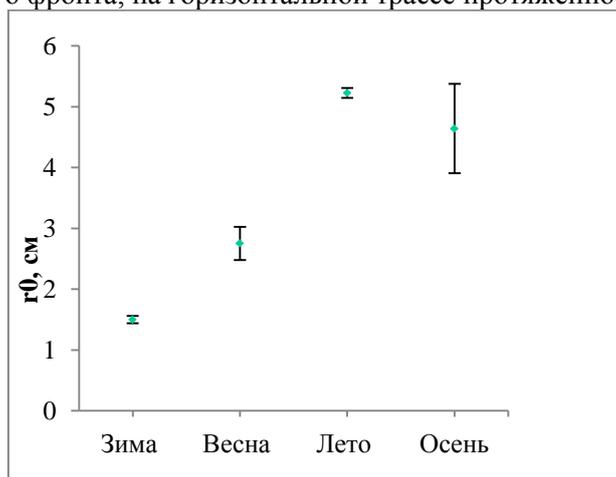
Из Таблицы 1 видно, что при всех величинах  $D/r_0$  скорректированное значение параметра Штреля примерно вчетверо больше, чем нескорректированное.

### 5. Эксперименты в области сильных флуктуаций

Эксперименты с макетами систем АО проводились [9-14] нами в последние годы, как на протяженных вертикальных, так и на горизонтальных атмосферных трассах. Измерения, выполненные с помощью ДВФ в приземном слое атмосферы, показали, что помимо сезонного и суточного ходов имеет место быстрая [13, 14] изменчивость интенсивности турбулентности, что приводит к изменчивости ее интегрального значения даже на протяженных горизонтальных трассах.



**Рисунок 4.** Временные изменения радиуса когерентности, измеренные с помощью датчика волнового фронта, на горизонтальной трассе протяженностью 2 км.

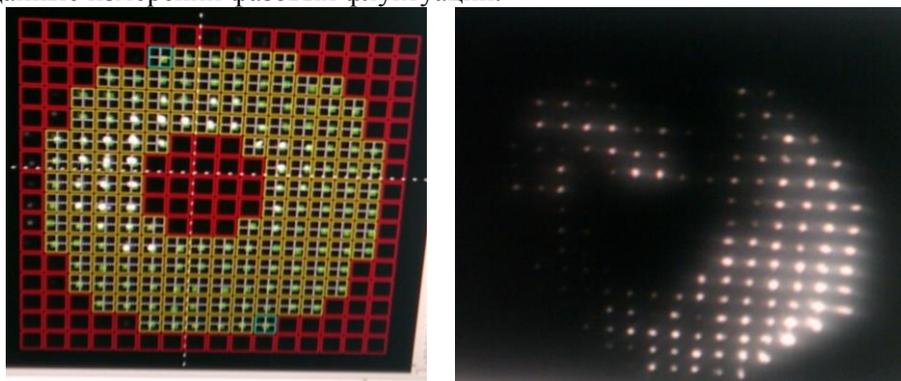


**Рисунок 5.** Сезонные изменения радиуса когерентности (для длины волны 0.55 мкм), измеренные с помощью датчика волнового фронта, на астрономической трассе в районе озера Байкал.

Обнаружен резкий сезонный ход [9-12] уровня интегральной турбулентности на наклонных астрономических трассах: для лета радиус когерентности составляет в среднем 4.6 см, а для зимы – 1.5 см.

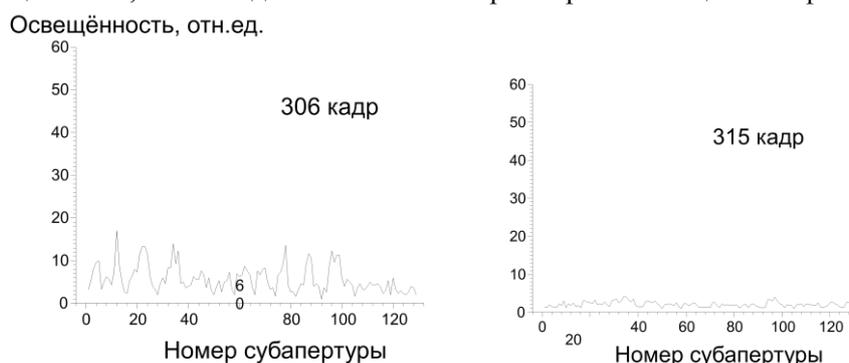
Сравнение поведения измеренных модовых составляющих фазовых искажений при слабых и сильных флуктуациях интенсивности показывает, что появление флуктуаций интенсивности приводит к паразитной модуляции спектров низших мод, что обуславливает потерю эффективности фазовой коррекции. И это, прежде всего, сказывается на данных фазовых измерений, выполняемых с помощью классического датчика волнового фронта – Шека-Гартмана

Известно, что в датчике Шека-Гартмана информация о флуктуациях фазы определяется из положений центров тяжести системы фокальных пятен. В условиях слабых флуктуаций интенсивности эти величины измеряются с высокой точностью (доли пикселя). Глубокая амплитудная модуляция в оптической волне обуславливает сильные флуктуации освещенности отдельных пятен, вплоть до их полного замирания, что приводит к потере информативности сигнала. С точки зрения измерений это означает, что фактически амплитудные флуктуации влияют на данные измерений фазовых флуктуаций.



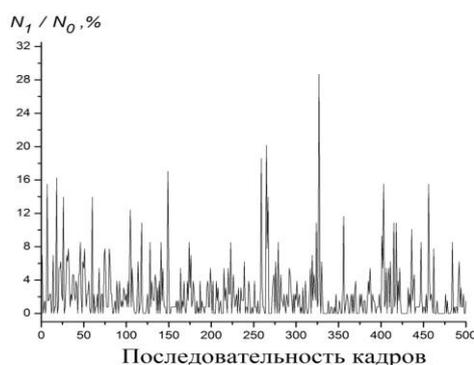
**Рисунок 6.** Характерный внешний вид картины фокальных пятен в датчике Гартмана при различных режимах слабых (слева) и сильных (справа) флуктуаций.

Для дальнейшего анализа ситуации был выполнен анализ точности оценки положения центров тяжести фокальных картин в датчике Гартмана с использованием различных пороговых значений освещенности, вплоть до значения в 1.5 раза превышающего их фоновое значение.



**Рисунок 7, 8.** Распределения освещенности (для двух кадров) фокальных пятен по апертуре датчика волнового фронта при различных значениях пороговой освещенности.

Следующим шагом по развитию систем АО нам представляется поиск возможностей работы системы АО при «сильных» амплитудных проявлениях. На наш взгляд, одним из методов борьбы [15] с влиянием мерцаний может стать автоматическая выбраковка отдельных субапертур в картине датчика, которые не будут использованы для восстановления фазы. При этом в процессе расчета фазовых флуктуаций будут использованы только «хорошие» субапертуры, где освещенность превышает пороговую.



**Рисунок 9.**  $N_1$  – количество субапертур, в которых освещенность в максимуме дифракционной картины ниже пороговой,  $N_0$  – общее количество полностью освещенных субапертур в выходном зрачке телескопа. За пороговую принята освещенность, превышающая фоновую в 1,5 раза.

На рис. 9 – показана последовательность кадров в реализации оптического эксперимента, где был использован датчик Шека-Гартмана. Рисунок дает зависимость числа субапертур, на которых освещенность в максимуме оказывается ниже пороговой. Таким образом, оказывается, что на отдельных кадрах происходит «замирание» уровня освещенности почти до нуля.

Кроме проведения выбраковки отдельных субапертур, также для борьбы с влиянием амплитудных флуктуаций возможно использование многокаскадной фазовой коррекции с применением нефазовых датчиков для измерения флуктуаций общего наклона и дефокусировки волнового фронта.

## 6. Литература

- [1] Fortes, B.V. Potential capabilities of adaptive optical systems in the atmosphere / B.V. Fortes, F.Yu. Kanev, P.A. Konyaev, V.P. Lukin // *Journ. Opt. Soc. Am. A.* – 1994. – Vol. 11(2). – P. 903-907.
- [2] Lukin, V.P. Estimation of turbulent degradation and required spatial resolution of adaptive systems / V.P. Lukin, B.V. Fortes // *Remote Sensing. Proc.SPIE.* – 1998. – Vol. 3494. – P. 191-202.
- [3] Лукин, В.П. Адаптивная коррекция сфокусированного пучка в условиях сильных флуктуаций интенсивности / В.П. Лукин, Б.В. Фортеc // *Оптика атмосферы и океана.* – 2000. – Т. 13, № 5. – С. 515-520.
- [4] Lukin, V.P. Anisoplanatic degradation of correction with real beacon // *Selected Papers. SPIE Press.* – 2000. – Vol. 4338. – P. 107-117.
- [5] Lukin, V.P. Optical vortices: creation, annihilation, and modeling / V.P. Lukin, V.A. Sennikov, V.A. Tartakovski // *Selected Papers. SPIE Press.* – 2000. – Vol. 4338. – P. 57-67.
- [6] Lukin, V.P. Adaptive correction of the focused beam in conditions with strong fluctuations of intensity / V.P. Lukin, B.V. Fortes // *Proc. SPIE.* – 2000. – Vol. 4034. – P. 176-183.
- [7] Lukin, V.P. Phase-correction of turbulent distortions of an optical wave propagating under strong intensity fluctuations / V.P. Lukin, B.V. Fortes // *Applied Optics.* – 2002. – Vol. 41(27). – P. 5616-5624.
- [8] Primmerman, C.A. Atmospheric-compensation experiments in strong-turbulence conditions / C.A. Primmerman, T.R. Price, R.A. Humphreys, B.G. Zollars, H.T. Barclay, J. Herrmann // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34. – P. 2081-2089.
- [9] Botygina, N.N. The development of the elements for creating adaptive optics system for solar telescope / N.N. Botygina, O.N. Emaleev, P.A. Konyaev, E.A. Kopylov, V.P. Lukin // *J. Appl. Remote Sensing.* – 2018. – Vol. 12(4). – P. 042403. DOI: 10.1117/1.JRS.12.042403.

- [10] Kopylov, E.A. Methods of image correction formed on horizontal long paths / E.A. Kopylov, V.V. Lavrinov, V.P. Lukin, A.A. Selin // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10677. – P. 10665-10677. DOI: 10.1117/12.2309327.
- [11] Botygina, N.N. Development of elements for an adaptive optics system for solar telescope / N.N. Botygina, O.N. Emaleev, P.A. Konyaev, E.A. Kopylov, V.P. Lukin // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10703. – P. 107032P.
- [12] Lukin, V.P. Adaptive image correction for long-path propagation / V.P. Lukin, V.V. Lavrinov, E.A. Kopylov, A.A. Selin // IEEE Proc. ICLO. – 2018. – P. 8435596. DOI: 10.1109/LO.2018.8435596.
- [13] Ботыгина, Н.Н. Развитие элементной базы для создания системы адаптивной оптики на солнечном телескопе / Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, П.А. Коняев, Е.А. Копылов, В.П. Лукин // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 11. – С. 990-997.
- [14] Ботыгина, Н.Н. Двухзеркальная адаптивная система коррекции атмосферных помех Большого солнечного вакуумного телескопа / Н.Н. Ботыгина, Д.Ю. Колобов, П.Г. Ковадло, В.П. Лукин, С.А. Чупраков, А.Ю. Шиховцев // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 7. – С. 563-569. DOI: 10.15372/AOO20180710.
- [15] Лукин, В.П. Адаптивная коррекция изображения для некогерентного источника-объекта // Квантовая электроника. – 2019. – Т.49, № 2. – С. 162-168.

## Features of adaptive phase correction of optical wave distortions in conditions of intensity fluctuations

N.N. Botygina<sup>1</sup>, O.N. Emaleev<sup>1</sup>, V.V. Lavrinov<sup>1</sup>, V.P. Lukin<sup>1</sup>, A.A. Selin<sup>1</sup>, E.L. Soin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Zuev ave. 1, Tomsk, Russia, 634055

**Abstract.** The reason for the loss of the adaptive phase correction efficiency in the propagation of optical waves in a turbulent atmosphere under strong intensity fluctuations is explained experimentally for the first time. According to the experiments performed on both horizontal and vertical atmospheric paths, it was found that when the coherence radius in the optical wave becomes less than the first Fresnel zone, the intensity fluctuations begin to affect the data of phase measurements. This leads to the fact that the main meter of the AO system – the Hartmann sensor – in the presence of deep amplitude modulation does not provide the correct measurement of the phase distribution. Based on the study of the behavior of modal components of phase fluctuations, reconstructed from data of measurements in different modes of operation, it was discovered that in the first place, are distortions of the lower modes of the decomposition of phase fluctuations – tilts, defocus and astigmatism, and the analysis shows that these modes are very different from the classical one, corresponding to the regime of weak fluctuations.