

УДК 520

## **К вопросу об эффективности крупногабаритных оптических телескопов**

проф., д.т.н. Сычев В. В.<sup>1,\*</sup>

[\\*viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Разработка и реализация проектов крупногабаритных оптических телескопов как у нас, так и за рубежом происходило на основе различных концепций построения. В каждом из этих проектов неизбежно решались проблемы оптимизации технических характеристик и параметров конструкции и аппаратуры телескопа. Ключевыми из них являлись характеристики и параметры несущего корпуса (опорно-поворотного устройства), крупногабаритной оптики телескопа и систем автоматического управления силовыми и прецизионными приводами в системе адаптивной коррекции изображения. Всегда стоял вопрос - какую концепцию выбрать. В статье предложен комплексный критерий, позволяющий не только оценить эффективность крупногабаритных оптических телескопов, но и сравнить между собой их концептуальный и технологический уровень с точки зрения получения информации. Предложен новый термин – инвариант информативности, характеризующий информативные возможности выбранной концепции и реализующей технологии. Это позволит избежать неоправданных осложнений технических решений, ошибочных акцентов и лишних материальных затрат при разработке проекта.

**Ключевые слова:** крупногабаритные оптические телескопы, коэффициент инвариантности, инвариант информативности, дифракционное изображение точки

---

### **Введение**

Проблемами создания супертелескопов 5 поколения (25-метрового и больших размеров) ученые и инженеры начали заниматься уже в начале 90-х годов прошлого века, когда разворачивалось проектирование и строительство четвертого поколения оптических телескопов 10-метрового класса. В последние годы XX века, когда реализация основных проектов телескопов четвертого поколения вступила в завершающую фазу, эти исследования начали расширяться и углубляться. Невзирая на сложность стоящих проблем вслед за предложениями по 25-метровым телескопам последовали аванпроекты телескопов с апертурой 50 метров, и даже 100 метров [1,2,4,6].

В нашей стране первое предложение по проекту 25-метрового телескопа относится еще ко временам СССР [11]. Однако содержательная работа началась только в 1992 году, когда тремя федеральными ведомствами – Министерством оборонной промышленности,

Министерством науки и РАН было принято «Совместное решение о необходимости создания Объединенной Российской астрономической обсерватории и оснащении ее современными инструментами 10...25 метрового классов», а в НПО «Астрофизика» было сформировано отдельное направление исследований - «Крупногабаритное телескопостроение на основе средств адаптивной оптики».

Основной целью работ было поставлено проведение фундаментальных научно-исследовательских и прикладных опытно-конструкторских работ, а также проведение технологических исследований, направленных на создание крупногабаритного астрономического адаптивного телескопа с составным главным зеркалом 25 м на базе отечественных технологий, позволяющих превзойти существующие мировые разработки по техническим характеристикам и снизить затраты и сроки на его изготовление.

## **1. Критерии оценки эффективности крупногабаритных оптических телескопов.**

Развитие работ по созданию крупногабаритного адаптивного астрономического телескопа на основе выбранной отечественной концепции телескопа с составным главным зеркалом (АСТ-25) неизбежно упирается в проблемы оптимизации технических характеристик и параметров конструкции и аппаратуры телескопа. Ключевыми являются характеристики и параметры несущего корпуса (опорно-поворотного устройства), крупногабаритной оптики телескопа и систем автоматического управления силовыми и прецизионными приводами. Именно они определяют дальнейший успех всей работы [8-10].

Однако встает вопрос: как оценивать эффективность таких телескопов, по каким критериям, как оценить целесообразность того или иного проекта адаптивного крупногабаритного телескопа [4,7]. Оценивать по разрешающей способности, этого явно недостаточно. По величине углового поля – тоже вряд ли. Ну а может быть по звездной величине. Все эти критерии связаны между собой. Улучшение одного из этих параметров неизбежно приводит к ухудшению остальных. Очевидно, тут нужен некий обобщенный критерий, учитывающий все параметры и особенности концепции построения крупногабаритного телескопа. Таковым может служить критерий информативности телескопа.

Такой критерий может ответить на важный вопрос: насколько тот или иной проект создания крупногабаритного телескопа эффективен по сравнению с остальными и насколько в связи с этим целесообразна его реализация.

Первично основные оптические параметры были определены нами более 10 лет назад (ТСП-25). К настоящему времени в мире появился ряд проектов телескопов с параметрами близкими к проекту АСТ-25.

## 2. Сравнительный анализ проектов телескопов. Коэффициент инвариантности.

Проведем сравнительный анализ имеющихся проектов. Для этого воспользуемся предложенным еще в 40-х годах Волосовым Д.С.[12] так называемым «коэффициентом инвариантности» регистрирующих оптических систем, определяющим их добротность

$$C = \frac{tgW \sqrt{\frac{f}{100}}}{n}, \quad (1)$$

здесь С – коэффициент инвариантности,

W – угловое поле объектива телескопа в угловых минутах,

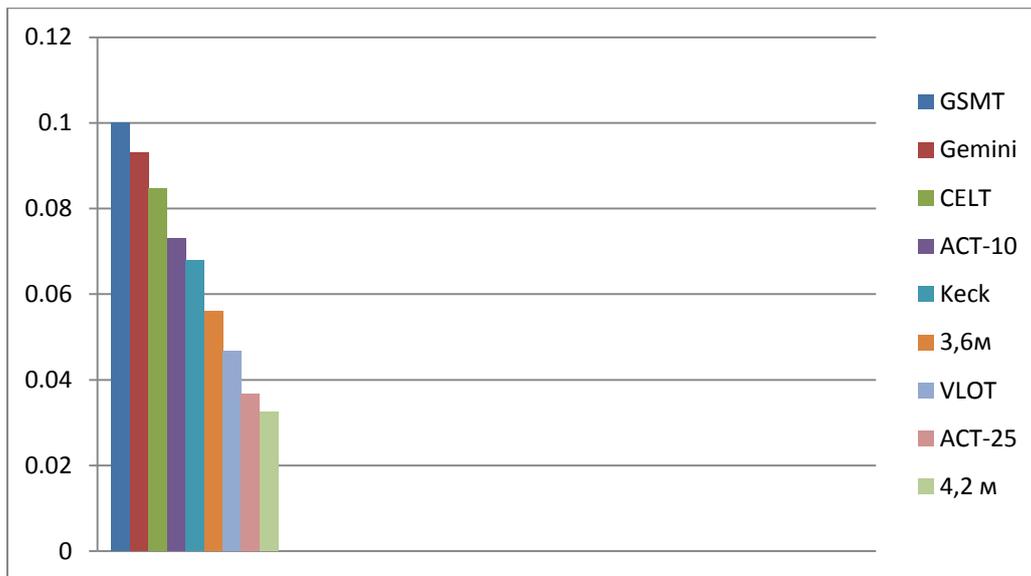
f – фокусное расстояние в мм,

n – знаменатель относительного отверстия объектива телескопа.

В таблице и на графиках представлены основные параметры проектируемых телескопов и расчетные значения коэффициента инвариантности.

**Таблица 1.**

№ п/п	Телескоп	Д главного зеркала, м	Фокусное расстояние f, м	Знаменатель относительного отверстия n	Угловое поле W	Коэффициент инвариантности
1	4,2 м Англия	4,2	13,5	3,2	30'	0,0326
2	3,6м Франция, Канада	3,6	14,0	3,8	1°	0,056
3	Кеск	10,0	17,5	1,75	30'	0,068
4	1,8 х 6 МЗТ	1,8 х 6	4,94	2,72	4'	0,0031
5	ТСП-25	25	37,5	1,5	5'	0,0194
6	АСТ-1200	1,2	12,0	10	5'	0,016
7	АСТ-10	10	15,0	1,5	30'	0,073
8	Gemini	8,0	15,5	1,5	30'	0,093
9	OWL	100,0	150	1,5	3'	0,0232
10	CELT	30,0	45,0	1,5	20'	0,0848
11	EURO-50	50,0	42,5	0,85	4'	0,029
12	GSMT	30,0	30,0	1,0	20'	0,1
13	VLOT	20,0	20,0	1	11' 6'	0,0467 0,0254
14	АСТ-25	25,0	37,5	1,5	10'	0,0367



**Рис. 1.** Градация телескопов по величине коэффициента инвариантности.

Из представленных данных (табл.1 и рис.1) видно, что разброс величин коэффициента инвариантности весьма велик, он колеблется от 0,0031 (M3T) до 0,1 (GSMT), т.е. в 30 раз. Лучшим в этой градации (см. рис.1) телескопов является GSMT. Однако это свидетельствует только о том, что оптическая система GSMT лучшая чисто теоретически, так как технологические сложности реализации данной оптической системы не позволят достигнуть необходимого качества изображения при заданных параметрах телескопа. В этом случае будет иметь место значительная потеря полезной информации.

Коэффициент инвариантности не позволяет учесть коррекционные возможности оптической системы, а потому непригоден для оценки эффективности оптических крупногабаритных телескопов по признаку информативности [3,5].

Как видно из формулы (1) увеличение коэффициента инвариантности за счет повышения светосилы объектива телескопа до  $1,0 \div 0,85$  влечет за собой резкое снижение получаемого качества изображения.

Можно с достаточной уверенностью говорить о том, что нужное качество изображения в телескопах CELT и GSMT ( $D = 30$  м) может быть достигнуто лишь в узком спектральном диапазоне при использовании линзовых корректоров и средств адаптивной коррекции изображения, что приведет к потере информации.

Итак, коэффициент инвариантности как критерий эффективности не может быть использован, т.к. не учитывает реальное качество изображения, даваемого телескопом.

Поэтому в качестве критерия эффективности крупногабаритного телескопа мог бы выступить критерий, основанный на его информативности, т.е. на количестве информации, которое можно получить на выходе телескопа.

### 3. Критерий эффективности крупногабаритных оптических телескопов.

#### Инвариант информативности.

Введем новое понятие «инвариант информативности», включающий в себя основные первичные оптические параметры телескопа, от которых зависит количество информации на выходе телескопа. Что такое «инвариант»? Это слово произошло от латинского «invariantis»- неизменяющийся. Инвариант информативности – это комплексный показатель, характеризующий способность оптического телескопа извлекать информацию из информационного пространства, зависящий от первичных параметров выбранной оптической системы и являющийся неизменной величиной для данного телескопа.

В работах [1,11] было показано, что при увеличении диаметра главного зеркала телескопа, наряду с ростом потока, поступающего на вход телескопа, растут и потери, снижающие информационную емкость изображения, даваемого телескопом. Причем, потери растут быстрее, чем поток на входе при увеличении диаметра. Вместо того, чтобы получить выигрыш в росте получаемой информации, мы, наоборот, теряем информацию. В работе был предложен диапазон полезных значений диаметров телескопов, определяемых допустимым ухудшением качества изображения. А допустимое ухудшение качества изображения обеспечивается выбранной концепцией построения телескопа и существующим уровнем технологии. На сегодняшний день наибольший диаметр телескопа не должен превышать 25 метров. Все что больше – нецелесообразно и является финансовой «разводкой» спонсоров или как у нас говорят «деньги на ветер».

Посмотрим, насколько эти рассуждения справедливы. Воспользуемся вновь введенным инвариантом информативности.

Достаточно очевидно утверждение, что чем больше диаметр  $D$  зеркала телескопа, чем больше его угловое поле  $w$  и чем больше пропускание оптической системы  $\tau_{\text{опт}}$ , тем большее количество информации можно получить на выходе телескопа.

Если принять, что оптическая система телескопа дифракционного качества, то можно считать справедливым выражение

$$\xi_{\text{теор}} = \frac{\tau_{\text{опт}} \pi D^2 \text{tg}^2 w \lambda}{4 \delta_{\text{э}}^2}, \quad (2)$$

где  $\xi_{\text{теор}}$  – инвариант информативности оптического телескопа дифракционного качества,

$\tau_{\text{опт}}$  – коэффициент пропускания оптической системы телескопа, характеризующий потери информации в оптической системе,

$D$  – диаметр главного зеркала телескопа в метрах,

$w$  – угловое поле в радианах,

$\lambda$  – длина волны излучения,

$\delta_{\text{э}}$  – угловая величина дифракционного изображения точки для данной оптической системы.

Подставив значение  $\delta_{\text{э}} = 1,22 \frac{\lambda}{D}$

в формулу (2) и произведя несложные арифметические действия, получим окончательно

$$\xi_{\text{теор}} = 0,545\tau_{\text{опт}}D^4\text{tg}^2W/\lambda \quad (3)$$

Естественно, что реальный инвариант информативности  $\xi_{\text{реал}}$  оптического телескопа будет во много раз меньше, т.к. реальный размер изображения точки из-за влияния различных факторов будет больше дифракционного.

$$\xi_{\text{реал}} = \frac{\xi_{\text{теор}}}{K^2}, \quad (4)$$

где  $K^2 = \frac{\delta_{\text{э}}^2}{\delta_{\text{реал}}^2}$  – квадрат превышения реального изображения точки над дифракционным,

$\delta_{\text{реал}}^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2$  – реальный среднеквадратический размер изображения точки при действии  $i$ -тых искажающих факторов

По существу,  $\xi_{\text{теор}}$  характеризует рациональность концептуального построения телескопа, а  $\xi_{\text{реал}}$  – технологичность реализации проекта телескопа по критерию его информативности.

Теперь рассмотрим те же проекты телескопов с позиции инварианта информативности.

**Таблица 2.**

№ п/п	Телескоп	D главного зеркала, м	Пропускание оптической системы, $\tau_{\text{опт}}$	Угловое поле W	$\xi_{\text{теор}}$	$K^*$	$\xi_{\text{реал}}$
1	4,2 м Англия	4,2	0,6	30'	15399	2	3849
2	3,6м Франция, Канада	3,6	0,5	60'	28033	3	3114
3	Кеск	10,0	0,5	30'	412510	5	16500
4	1,8 х 6 МЗТ	1,8 х 6	0,3	4'	178	5	7
5	ТСП-25	25	0,2	5'	191595	7	3910
8	АСТ-1200	1,2	0,4	5'	2	5	0,08
9	АСТ-10	10	0,5	30'	412510	5	16500
10	Gemini	8,0	0,3	30'	101378	6	2816
11	OWL	100,0	0,1	3'	1765800	12	12262
12	CELT	30,0	0,1	20'	2970064	8	46407
13	EURO-50	50,0	0,1	4'	981000	9	12111
14	GSMT	30,0	0,1	20'	2970064	8	46407
15	VLOT	20,0	0,1	11' 6'	178560 50401	7 6	3644 1400
16	АСТ-25	25,0	0,6	10'	2148465	2	537116

\* ) – наиболее вероятная величина, возможны уточнения.

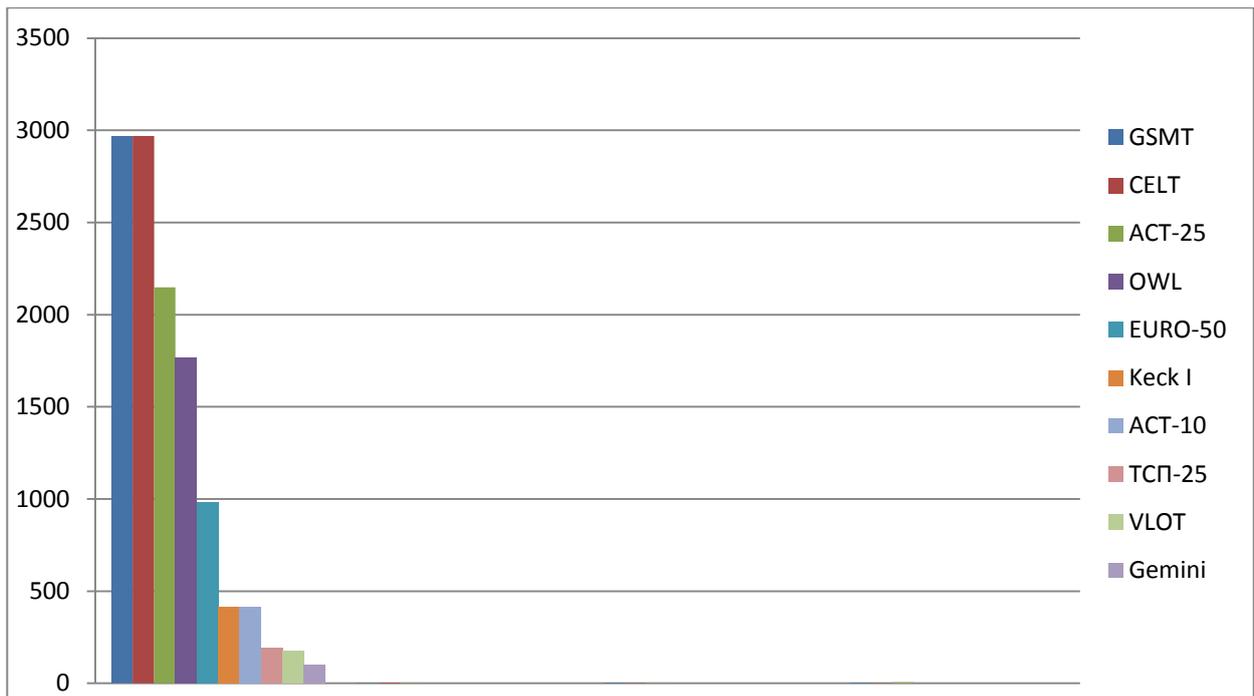
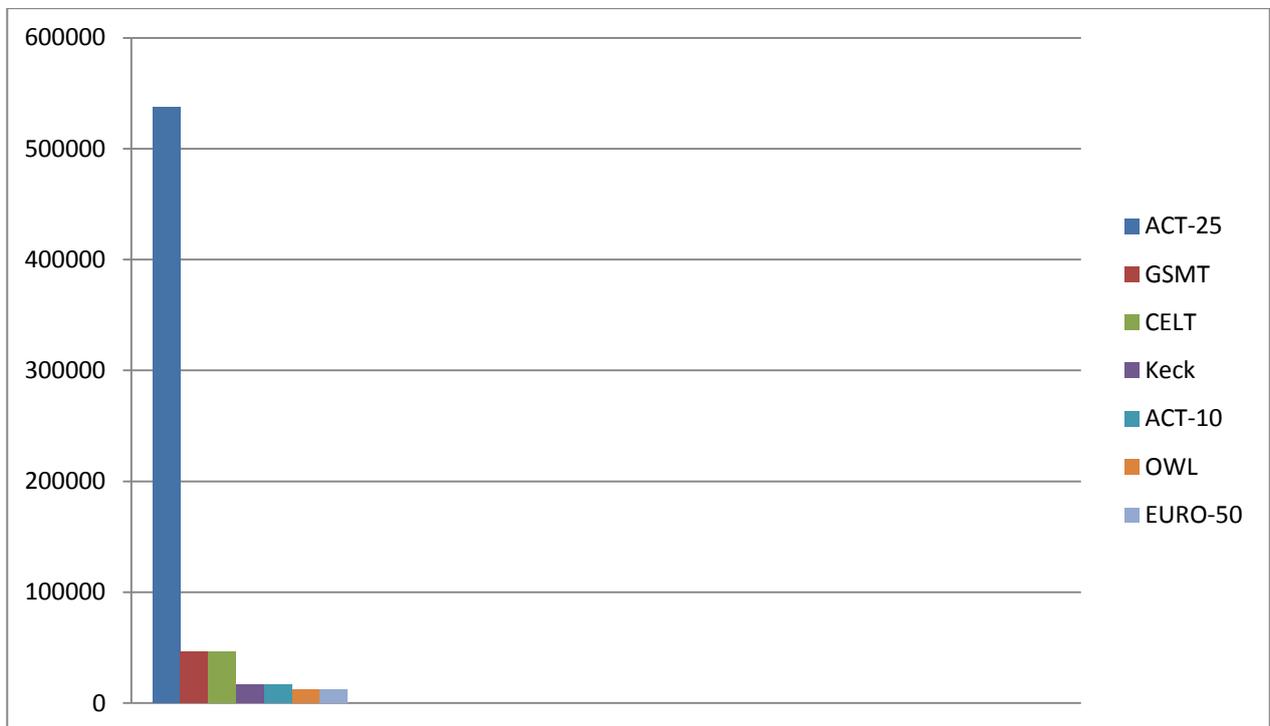
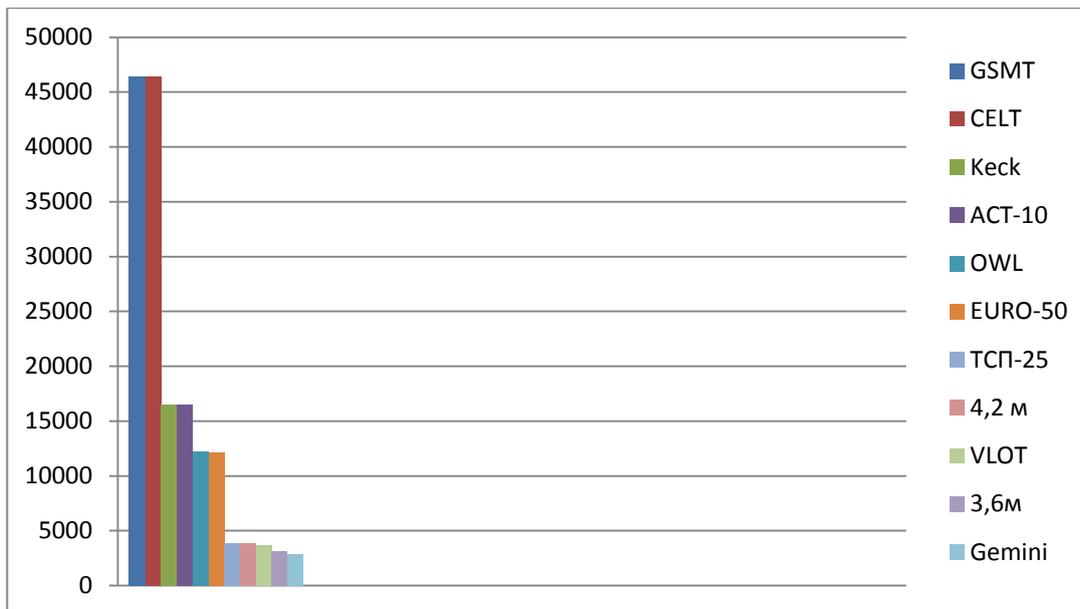


Рис. 2. Инвариант информативности различных концепций построения крупногабаритных телескопов



А)



Б)

Рис. 3. Инвариант информативности различных технологий реализации крупногабаритных телескопов.

А) – для проектов с 1 по 7, Б) – для проектов со 2 по 12.

Из представленных материалов (табл.2 и рис.2,3) можно сделать очень интересные и важные выводы. Оказывается концептуально лучшими являются три телескопа: GSMT, CELT и АСТ-25. Причем, по информативности АСТ-25 превосходит GSMT и CELT более, чем в 10 раз, а существующий Кеэк-телескоп – в 30 раз. Отсюда напрашивается вывод: выгоднее реализовать один АСТ-25, чем делать 10 GSMT или CELT. Еще раз подтверждается вывод, сделанный автором в марте 2000 года [11], заключающийся в том, что создавать телескопы наземного базирования с диаметром главного зеркала более 25 м для регистрации изображений чрезвычайно удаленных астрономических объектов не имеет здравого смысла. А создание телескопов с диаметрами от 30 до 100 м, как это видно из расчетов, не дает никаких преимуществ перед телескопами меньшего диаметра, а лишь чрезвычайно усложняет и удорожает проблему.

#### 4. Заключение.

Введение нового понятия инварианта информативности для крупногабаритных оптических телескопов позволило по-новому взглянуть на сам процесс разработки сложных оптико-электронных комплексов. Инвариант информативности как критерий эффективности дает возможность оценки и сравнения различных технических решений на этапе поиска оптимальных путей повышения информативности телескопов.

Инвариант информативности открывает дорогу новым технологиям в части использования легких и жестких конструкций, прецизионных нерасстраиваемых систем контроля пространственного положения оптических элементов, простых и надежных адаптивных средств коррекции искажений, всему тому, что положено в основу разработки

и создания проекта супертелескопа АСТ-25.

Кроме того, что весьма существенно, инвариант информативности закрывает дорогу заблуждениям в части возможности увеличения количества информации путем увеличения диаметра зеркала телескопа и освободит научно-техническую общественность от неудачных проектов и неоправданных материальных затрат.

### Список литературы

1. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении: монография. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2005. 464 с.
2. Максудов Д.Д. Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979. 395 с.
3. Сычев В.В. Метод определения информационной емкости изображения в крупногабаритных телескопах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/413768.html> (дата обращения 01.12.2014).
4. Walker G. Astronomical Observations: an Optical Perspective. Cambridge University press, 1987. 17 p.
5. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 84 с.
6. Стешенко Н.В., Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении // Итоги науки и техники. Сер. Управление пространственной структурой оптического излучения. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1990. С. 107-167.
7. Карапетян Б.О., Осканян В.С. Информационные критерии оценки эффективности астрофизических наблюдений // Доклады АН АрССР. 1978. Т. LXVII. С. 302-307.
8. Волентюк А.Н., Предко Н.Г. Оптическое изображение при дистанционном наблюдении. Минск: Наука и техника, 1991. 69 с.
9. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: пер. с нем. М.: Мир, 1978. 670 с.
10. Вержбицкая Г.М., Прокофьева В.В. Оценка эффективности астрономических ТВ систем // Новая техника в астрономии: сб. науч. тр. Л.: Наука, 1984. С. 113-118.
11. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. Problems in designing the 25-m-class supertelescope // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4004. P. 330-339. DOI: [10.1117/12.393939](https://doi.org/10.1117/12.393939)
12. Волосов Д.С. Методы расчета сложных фотографических систем. М.: ОГИЗ, 1948. 396 с.

## Revisiting the Effectiveness of Large Optical Telescopes

V.V. Sychev<sup>1,\*</sup>

[viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** large optical telescopes coefficient of invariance, informativeness invariant, the diffraction image of a point

---

To create large-size optical telescopes, various design concepts have been used. Each concept inevitably faced the challenge to optimize technical characteristics and parameters of the telescope. There was always a question: what concept to choose, how to estimate efficiency of such telescopes and by what criteria and how to estimate expediency of this or that project of the large-size telescope. It is, obviously, insufficient to make a resolution-based estimation. An estimate by the angular field size is inappropriate too. Well, it may be also an estimate by the stellar magnitude. All these criteria are related to each other. Improvement of one of these parameters inevitably leads to deterioration of the others. Obviously, the certain generalized criterion considering all parameters and features of the design concept of the large-size telescope is necessary here. As such can serve the criterion of informational content of the telescope.

The article offers a complex criterion allowing not only to estimate efficiency of large-size optical telescopes, but also to compare their conceptual and technological level among themselves in terms of obtaining information.

The article suggests a new term, i.e. the informational content invariant to characterize informative capacities of the chosen concept and of the realizing technology. It will allow us to avoid unjustified complications of technical solutions, wrong accents in designing and excess material inputs when developing the project.

The informational content criterion-based analysis of the existing projects of large-size telescopes has been convincingly shown that, conceptually, there are three best telescopes, namely: GSMT, CELT, and ACT-25. And, in terms of informational content, the ACT-25 is 10 times more than GSMT and CELT, and the existing Keck-telescope exceeds by 30 times. Hence, it is hard to escape a conclusion that it is more favourable to implement one ACT-25, than to do 10 GSMT or CELT. Once again the conclusion drawn by the author in March, 2000 [11] is confirmed: there is no common sense to create telescopes of land basing with a diameter of the main mirror more than 25 m to register images of extremely remote astronomical objects. And creation of telescopes with diameters from 30 to 100 m, as it is seen from calculations, does not give

any advantages over telescopes of smaller diameter, and only extremely complicates and raises the price of a problem.

It is shown that introduction of new concept of an invariant of informational content for large-size optical telescopes will allow to have a new look at the development process of complicated optic-electronic complexes. The informational content invariant as a criterion of efficiency enables an assessment and comparison of various technical solutions at the stage of search for optimum ways of increasing informational content of telescopes.

Besides, and it is quite essential, the invariant of informational content will disable the misapprehension regarding a possibility to increase amount of information by increasing a mirror diameter of the telescope and will prevent the scientific-and technological community from unsuccessful projects and unjustified material inputs.

In the early 1990's when design and implementation of the fourth generation of optical telescopes of a 10-meter class were under development scientists and engineers already started being engaged in problems of creating the super telescopes of the 5-th generation (25-meter and more). In recent years of the XX century when implementation of the main projects of telescopes of the fourth generation entered the finishing phase, these researches started extending and going deep. Despite the complicated problems the offers of 25-meter telescopes were followed by the avant-projects of telescopes with an aperture of 50 meters, and even 100 meters:

- influence of laser radiation on design elements and propagation medium and, as consequence, the back action of design elements and propagation medium on the transmitted radiation wave-front;

- lack of a basic source of radiation on the laser radiation wavelength, which is necessary for the adaptive correction methods to be applied to distorted wave-front;

- inherent only in laser systems additional distorting factors available in transmitting systems.

Such distorting factors are as follows:

- length of optical path because of spacing necessary for a high-power laser source with a large number of the consistent optical elements;

- thermal self-influence of powerful laser radiation in the channel of radiation transportation before its input in the forming optical system;

- instability of spatiotemporal characteristics of laser radiation source itself, which worsens passing radiation conditions both in an optical path and in the free atmosphere;

- thermal heterogeneity and thermal deformations.

It is shown that adaptive systems are distinguished from active optics by the fact that correction of the radiation wave-front distortions occurs in real time on the entire set of the distorting factors (not only on influence of the atmosphere) with the speed much exceeding action of distortions. Thus, the quality correction is assessed according to criterion of quality of primary image.

Thus, correction continuously considers information on the current spatial, temperature, temporary, and justified parameters of the optical system, providing quality maintenance of the image under conditions of distorting factors.

The main postulates of adaptive correction are formulated and offered.

Postulates represent the set of statements and provisions allowing us to realize effective remedies of adaptive correction of distortions.

It is also shown what real opportunities are open by using methods and means of adaptive optics in effective application of laser radiation power and what ways allow us to solve these tasks. First of all, it is:

- forming a system of assumptions and minimizing the distortions in the optical path, which includes, actually, a laser resonator, a channel for transportation of powerful laser radiation with beam-deflecting mirrors to form the telescope with a compound main mirror;
- forming the efficiency criteria of adaptive optical systems;
- multi-loop system for adaptive correction of distortions.

The paper discusses test results of transporting powerful laser radiation in the horizontal pathway and shows visual appearance of forming optical system of the test complex bench.

It is convincingly proved that the use of offered postulates in development or modernization of optical complexes ensures the minimum level of residual distortions and the overall performance of adaptive optics.

The offered postulates of adaptive correction of radiation wave-front and a positive experience of their use in full-scale optical complexes will substantially reduce terms and costs in creating effective aids to watch remote objects, as well as to form and supply the energy to the space objects for its various use such as power supply, communication, fight against space debris, ensuring asteroid safety, etc.

It is possible to draw a conclusion that the state of domestic optical science, its potential in creation of adaptive means to provide formation and transportation of powerful laser radiation, and results of theoretical and pilot studies, encourage a reasonable hope for future creating a multi-purpose highly effective large-size optic-electronic facility.

## References

1. Sychev V.V. *Adaptivnyye opticheskie sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroenii* [Adaptive optical systems in large-sized telescope construction]. Staryy Oskol, "Tonkie naukoemkie tekhnologii" Publ., 2005. 464 p. (in Russian).
2. Maksutov D.D. *Astronomicheskaya optika* [Astronomical optics]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 395 p. (in Russian).
3. Sychev V.V. Method for determination picture information capacity in large-sized telescopes. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 4. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/413768.html> , accessed 01.12.2014. (in Russian).

4. Walker G. *Astronomical Observations: an Optical Perspective*. Cambridge University press, 1987. 17 p.
5. Mikhel'son N.N. *Opticheskie teleskopy. Teoriya i konstruktsiya* [Optical telescopes. Theory and design]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 84 p. (in Russian).
6. Steshenko N.V., Sychev V.V. Adaptive optical systems in large-sized telescope construction. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Upravlenie prostranstvennoy strukturoy opticheskogo izlucheniya. T. 1* [Science and Technology Results. Ser. Control of spatial structure of optical radiation. Vol. 1]. Moscow, VINITI Publ., 1990, pp. 107-167. (in Russian).
7. Karapetyan B.O., Oskanyan V.S. Information criteria for evaluating the effectiveness of astrophysical observations. *Doklady Akademii Nauk ArSSR = Proceedings of Academy of Sciences of the Armenian SSR*, 1978, vol. 68, pp. 302-307. (in Russian).
8. Volentiuk A.N., Predko N.G. *Opticheskoe izobrazhenie pri distantsionnom nabliudenii* [An optical image of the remote observation]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1991. 69 p. (in Russian).
9. Freezer H. *Photographic recording of information*. Springer-Verlag, 1978. (Russ. ed.: Frizer Kh. *Fotograficheskaya registratsiya informatsii*. Moscow, Mir Publ., 1978. 670 p.).
10. Verzhbitskaya G.M., Prokof'eva V.V. Evaluating the effectiveness of astronomical television system. *Novaya tekhnika v astronomii: sb. nauch. tr.* [New techniques in astronomy: collected scientific articles]. Leningrad, Nauka Publ., 1984, pp. 113-118. (in Russian).
11. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. Problems in designing the 25-m-class supertelescope. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4004, pp. 330-339. DOI: [10.1117/12.393939](https://doi.org/10.1117/12.393939)
12. Volosov D.S. *Metody rascheta slozhnykh fotograficheskikh sistem* [Methods for calculating the complex photographic systems]. Moscow, OGIZ Publ., 1948. 396 p. (in Russian).