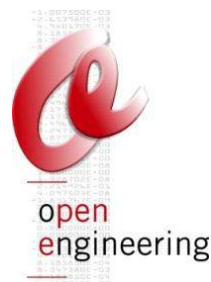


# OO**FELIE**::**M**ultiphysics for Advanced Optics



**Наталия Александровна Демкович**  
Ведущий инженер  
СП ЗАО «Би Питрон»

# ***ВВЕДЕНИЕ***

- Использование мультифизического опто-термо-электро-механического моделирования на этапе проектирования позволяет повысить надежность конструкции и обеспечить точность работы прибора.

# ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ

## НАЗЕМНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

- ❑ Гравитационные воздействия
- ❑ Вибрации
- ❑ Нагрев под лучами Солнца, суточные перепады температуры



# ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ

## ОРБИТАЛЬНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

- ❑ Изготовлены на Земле
- ❑ Работают в космосе
- ❑ Испытывают значительные перепады температур





# ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ БОРТОВАЯ ОПТИКА

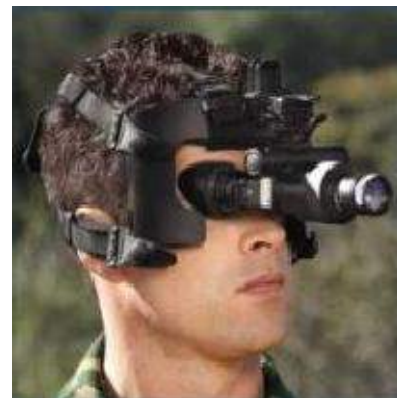
- ☐ Значительные ускорения
- ☐ Вибрации
- ☐ Температурные воздействия



# ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ

## ОПТИКА ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

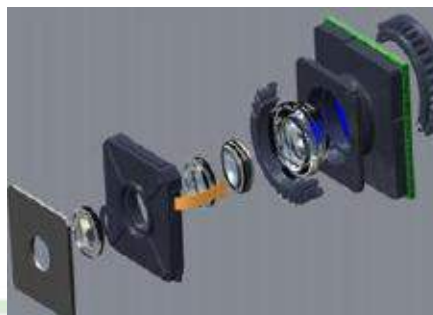
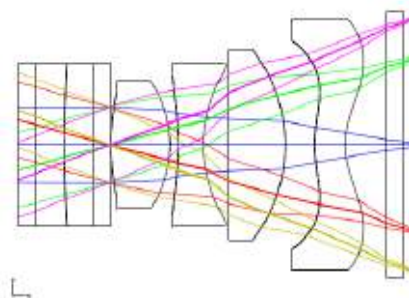
- ☐ Ударопрочность
- ☐ Работоспособность в широком диапазоне температур



# ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ

## МИКРООПТИКА И МОЭМС

- ❑ Фотокамеры мобильных телефонов, вебкамеры
  - Борьба за уменьшение размеров и веса
  - Электромагнитные помехи со стороны других компонентов
- ❑ МОЭМС:
  - малые размеры,
  - низкое энергопотребление,
  - высокое быстродействие
  - высокая точность



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предварительная оценка и оптимизация оптических характеристик

## ▪ Непрерывный процесс проектирования

- Анализ конструкции (механические и тепловые явления)
  - Деформации
  - Нагрузки и напряжения
  - Распределение температур в конструкции
- Электромеханические явления (например, пьезоэлектрические)

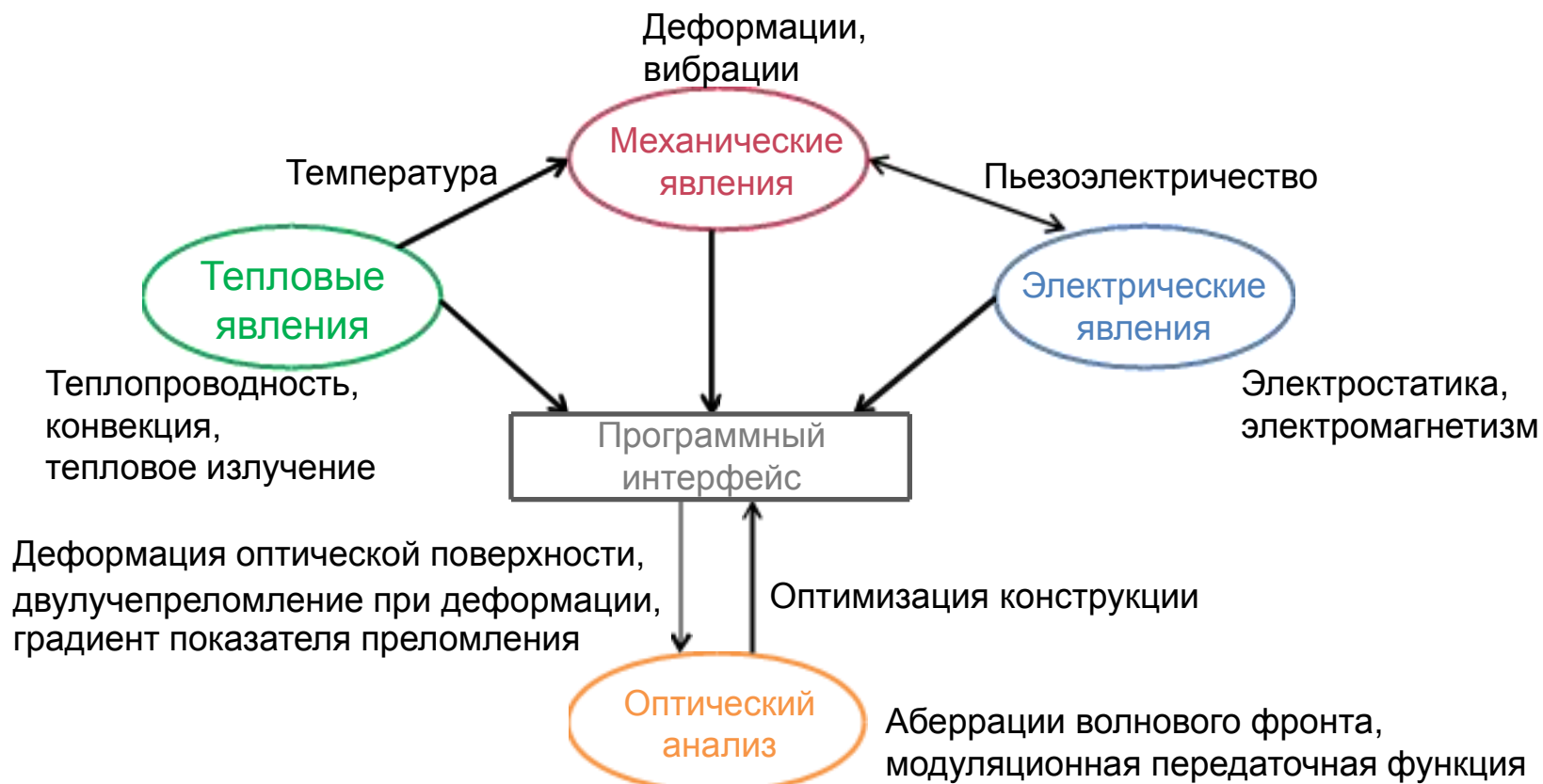
## Обработка результатов расчета

- Термооптический эффект ( $dn/dT$ ), GRIN – градиент показателя преломления
- Эффект двулучепреломления под действием механических нагрузок

Анализ оптических характеристик (программное обеспечение для моделирования прохождения лучей)



# МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



# OOFELIE::Multiphysics

## OOFELIE::Multiphysics

Thermomechanical

F.S.I.

Piezoelectric

PyroPiezoelectric

Electrostatic

Electro-  
thermomechanic

Electromagnetic

Vibro-Acoustics

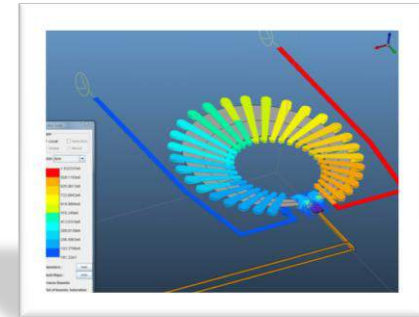
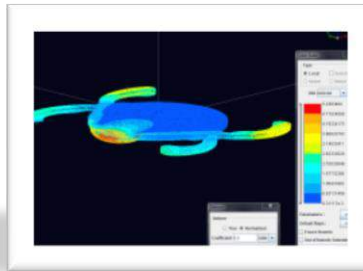
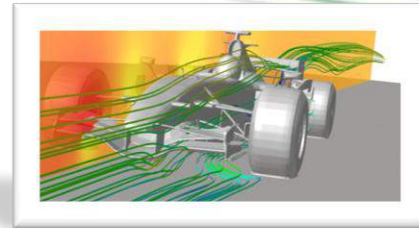
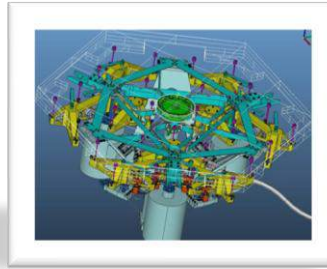
Mechanics

Thermics

Fluids

Electric

Acoustics



**Moldex3D**  
True 3D CAE for Injection Molding

**ZEMAX**  
DEVELOPMENT CORPORATION

**NUMECA**  
INTERNATIONAL

**SoftMEMS**  
Bringing MEMS to the Mainstream

Injection Analysis  
and Coupling

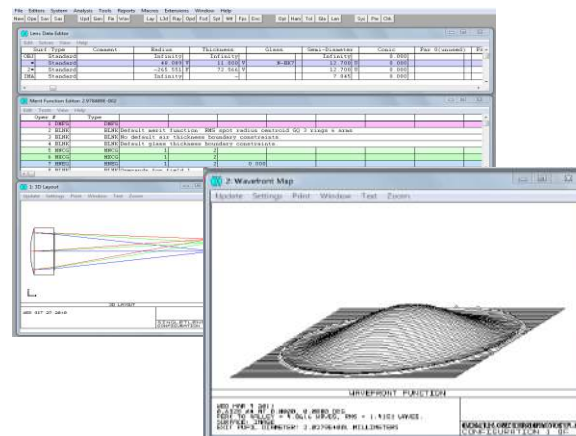
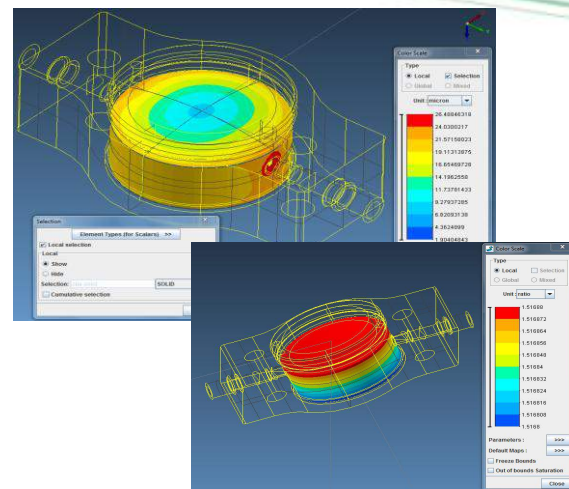
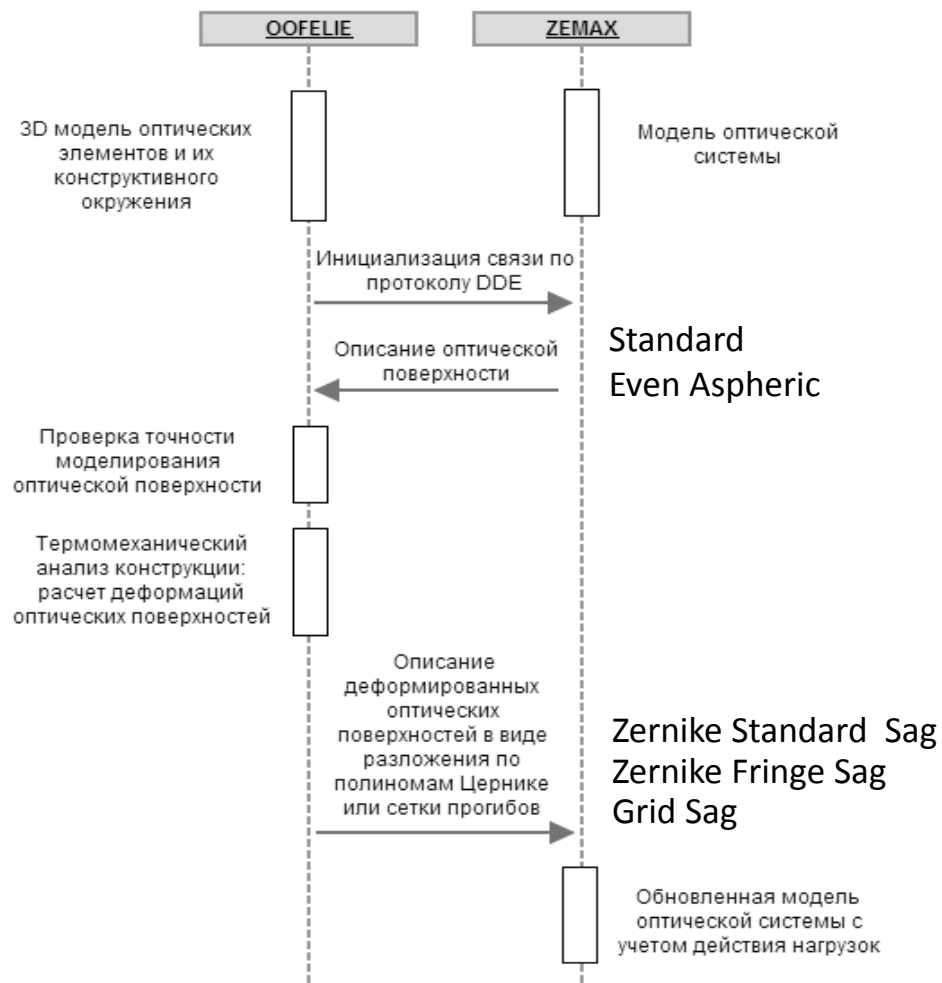
Optics Analysis  
and Coupling

CFD Analysis and  
Coupling

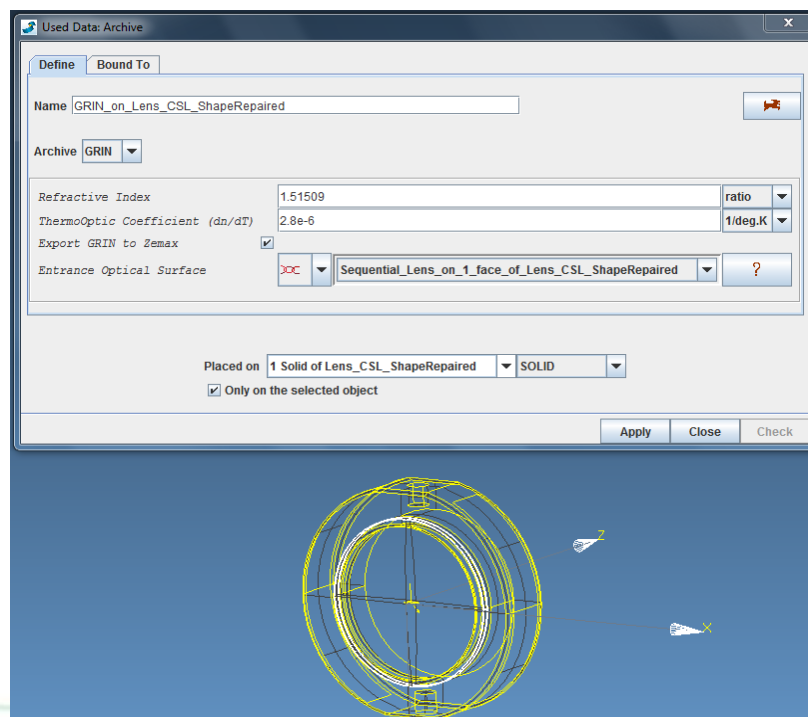
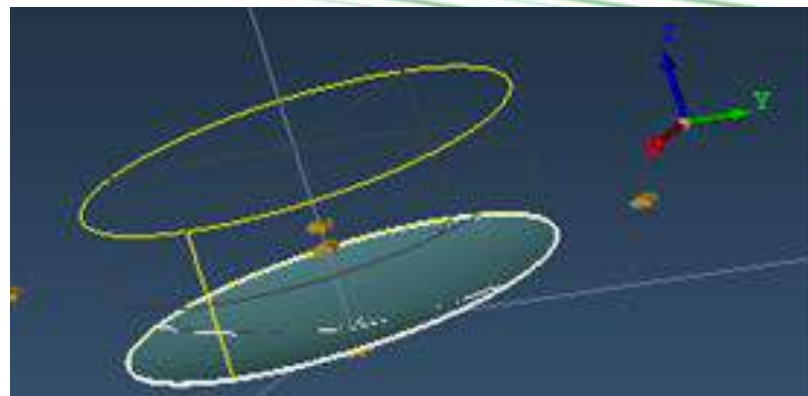
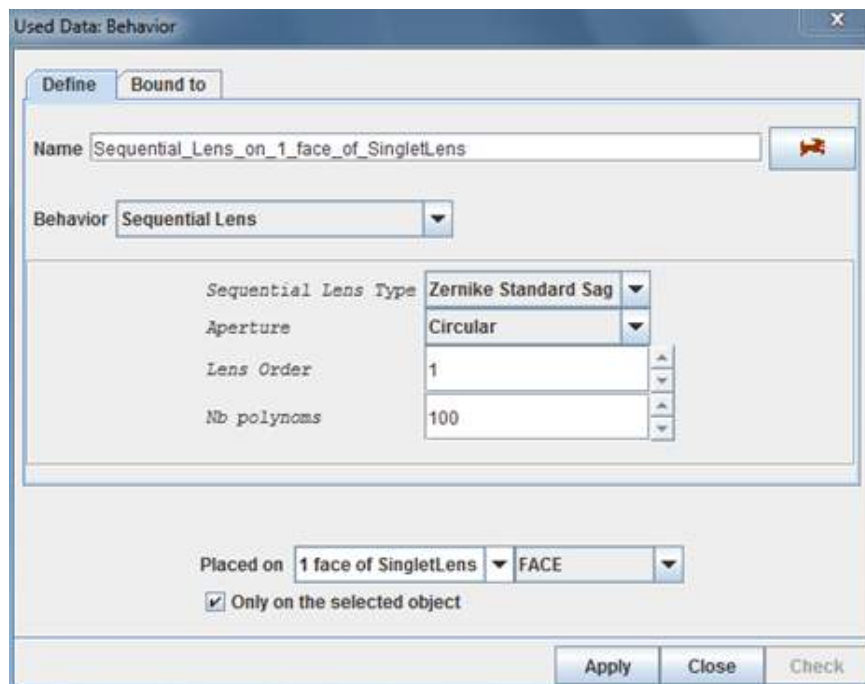
EDA link and  
coupling

OOFELIE::Multiphysics

# ИНТЕГРАЦИЯ С Zemax-EE ®



# ВЫБОР ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В OOFELIE GUI

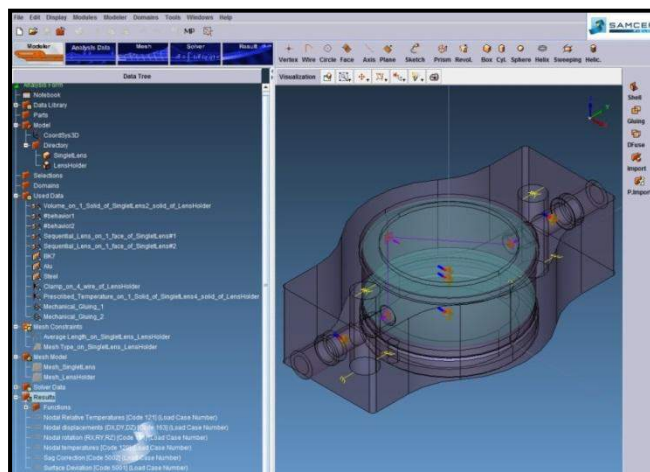


**Выбор оптических  
поверхностей  
непосредственно  
на геометрической  
модели**

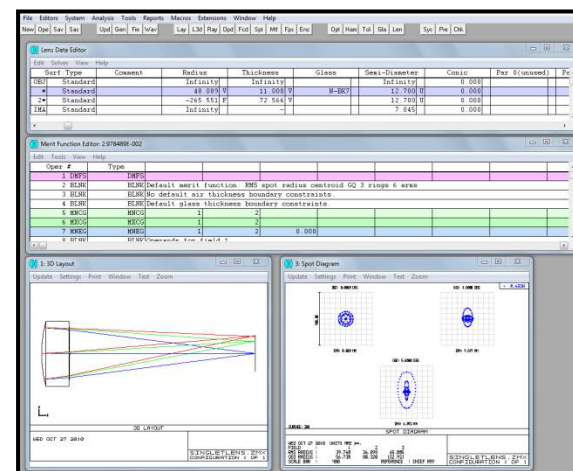


# СОВМЕСТИМОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ

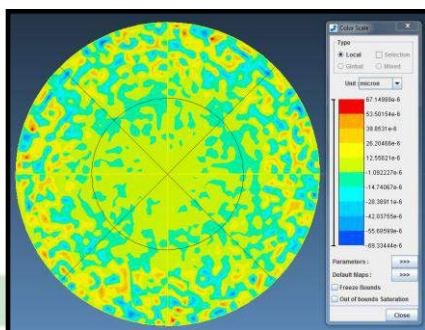
3D модель изделия  
в OOFELIE



Оптическая модель  
в ZEMAX



Корректировка положения узлов сетки → гарантия совместимости моделей



Высокая точность моделирования  
сложных поверхностей

# ЭКСПОРТ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА В ZEMAX

## ❑ Несколько возможностей экспорта:

- ❑ с учетом/без учета твердотельного движения
- ❑ только в направлении оси Z/с учетом деформаций в трех направлениях

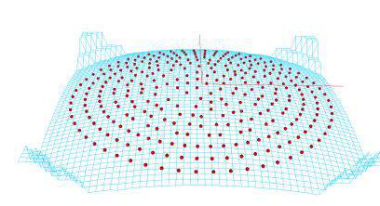


## ❑ Исходные типы поверхностей в ZEMAX:

- ✓ Standard
- ✓ Even Aspheric

## ❑ Описание деформаций поверхности через:

- ✓ Grid Sag
- ✓ Zernike Standard Sag or Zernike Fringe Sag

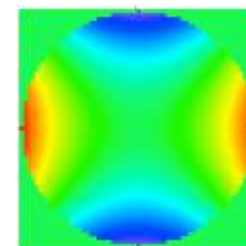


$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{r=1}^L A_r Z_r(\rho, \theta)$$

Standard equation

Even aspheric  
terms

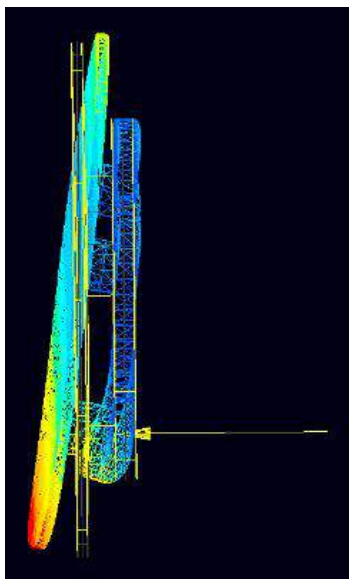
Zernike  
polynomials



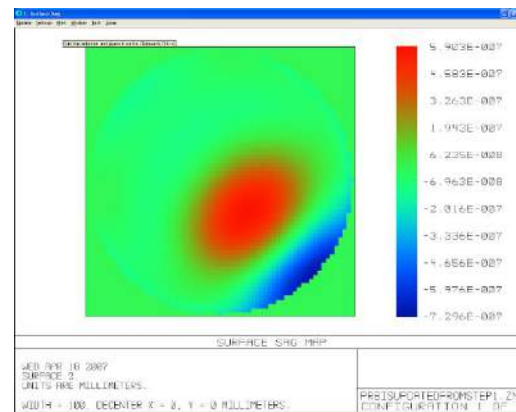
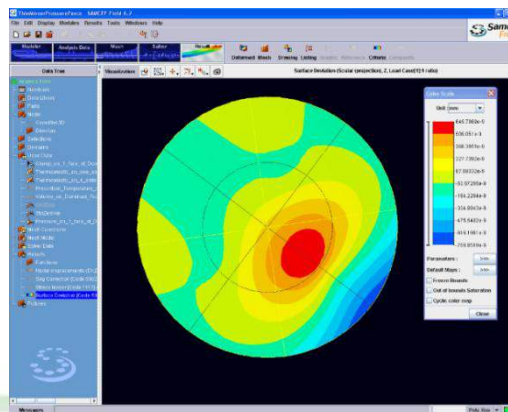
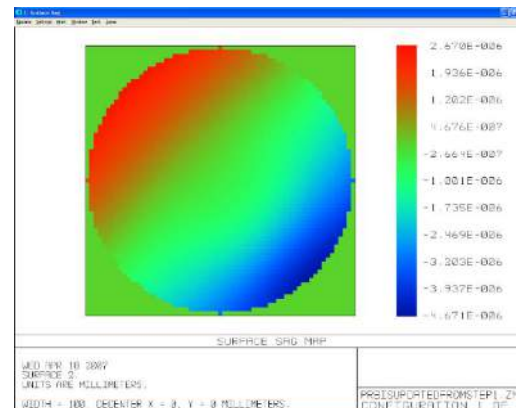
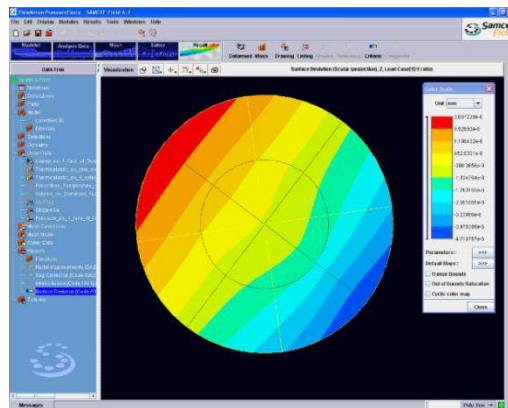
# ЭКСПОРТ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА В ZEMAX

- ❑ Возможность отделить Rigid Body Motion модели

Полные  
деформации



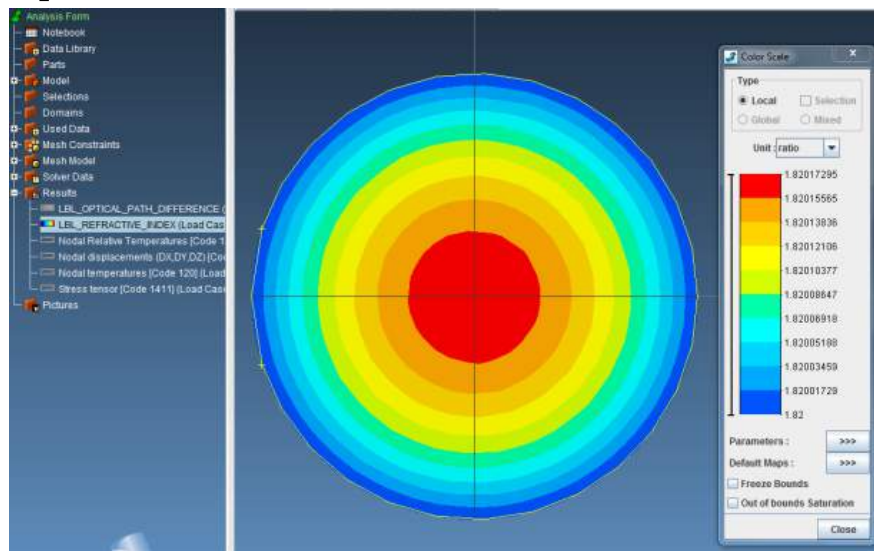
Упругие  
деформации  
(без учета RBM)



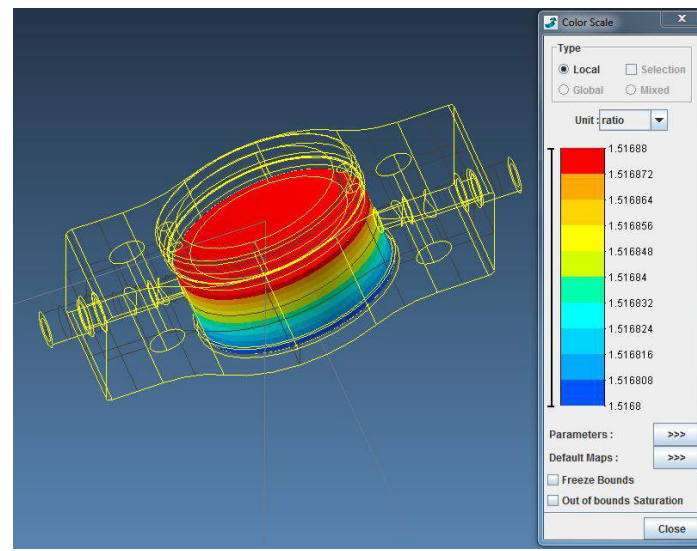


# GRIN: РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Неравномерный нагрев → градиент показателя преломления



Радиальный градиент



Осевой градиент

Coefficients of the refractive index polynomial approximation for lens (with Zemax lens unit):

Step 1

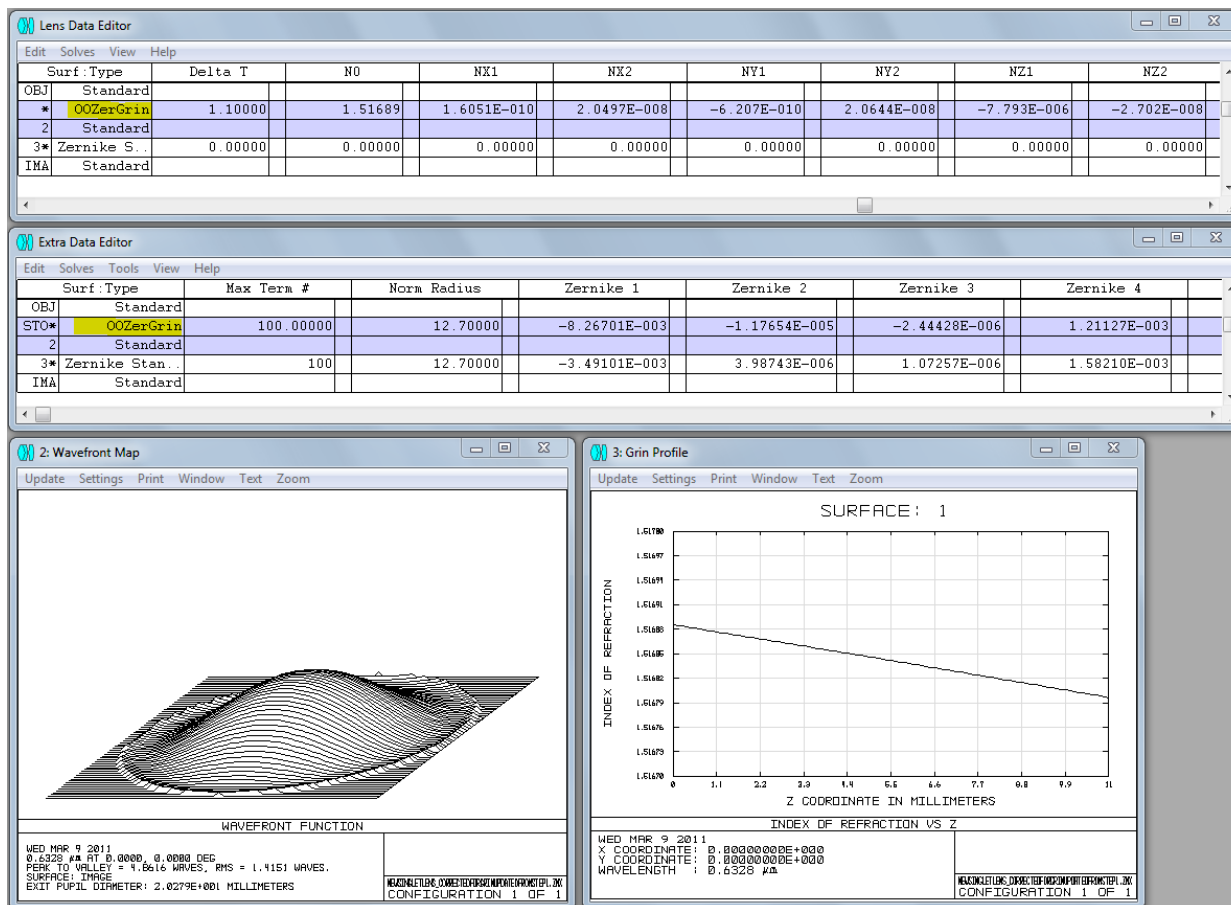
```
1.51689 * x^0 * y^0 * z^0  
+ 1.60513e-010 * x^1 * y^0 * z^0  
+ 2.0497e-008 * x^2 * y^0 * z^0  
- 6.20698e-010 * x^0 * y^1 * z^0  
+ 2.06443e-008 * x^0 * y^2 * z^0  
- 7.79326e-006 * x^0 * y^0 * z^1  
- 2.70159e-008 * x^0 * y^0 * z^2
```

$$n = n_0 + n_{x1}x + n_{x2}x^2 + n_{y1}y + n_{y2}y^2 + n_{z1}z + n_{z2}z^2$$



# GRIN: РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

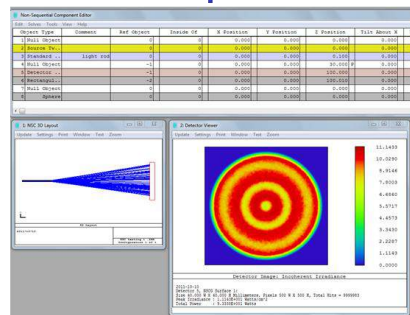
В ZEMAX одновременно экспортируются данные о деформациях оптической поверхности и распределении показателя преломления – пользовательский тип поверхности OZerGRIN



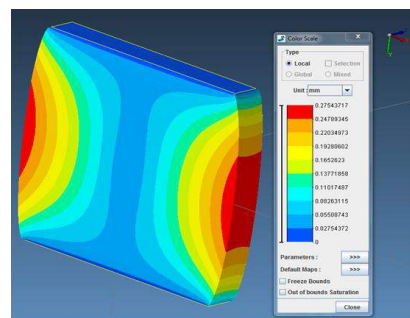
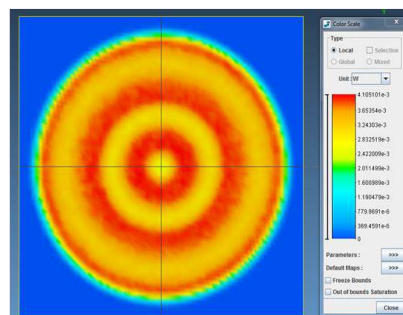
# РАСЧЕТ НАГРЕВА И ДЕФОРМАЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕТА

- Расчет нагрева и деформаций поверхности на основе диаграммы энергетической освещенности (Irradiance Map), импортированной из Zemax

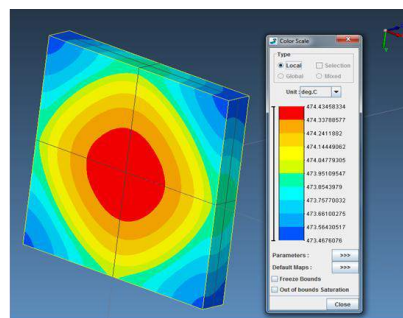
Irradiance map from ZEMAX



Surface heat flux in OOFELIE



Deformation



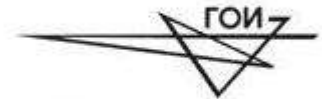
Temperature

## ***ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ OOFELIE***

- ❑ Задачи, которые были успешно решены с помощью OOFELIE for Advanced Optics

## ***ПОЛЬЗОВАТЕЛИ OOFELIE::Optics***

- ❑ ESA – European Space Agency
- ❑ AMOS – Advanced Mechanical and Optical Systems (Бельгия)
- ❑ ELI Beams - Extreme Light Infrastructure (Чехия)
- ❑ Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург, Россия)
- ❑ MT Stromlo & Siding Spring Observatories (Австралия)

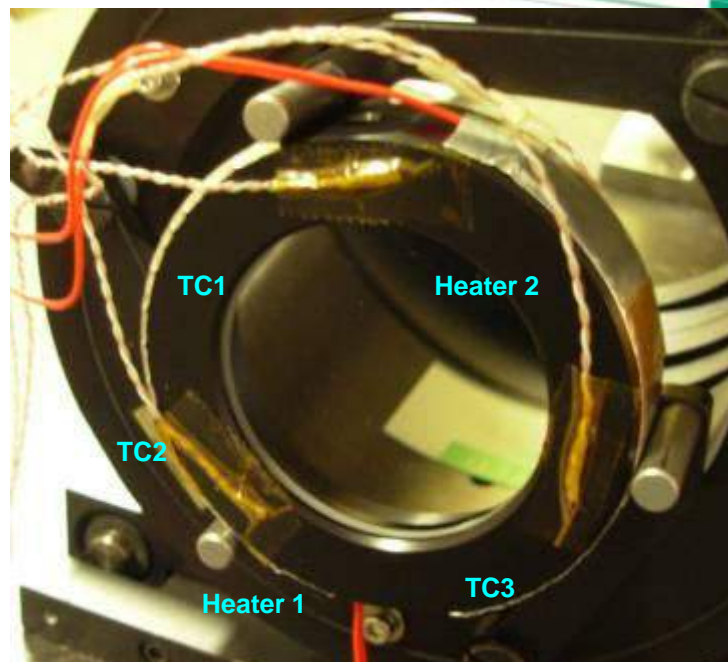
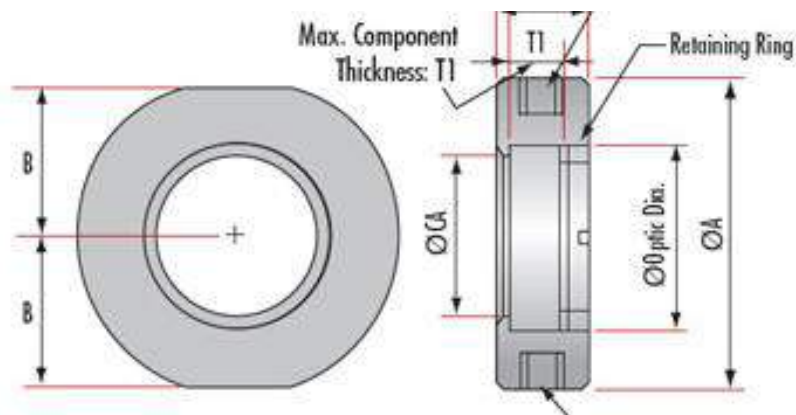




# ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ OOFELIE

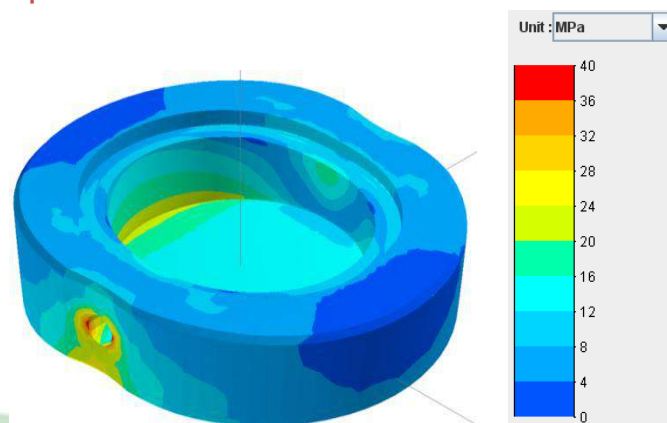
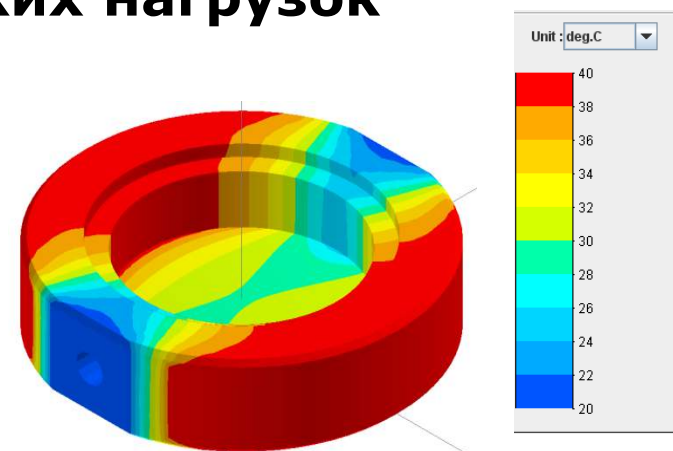
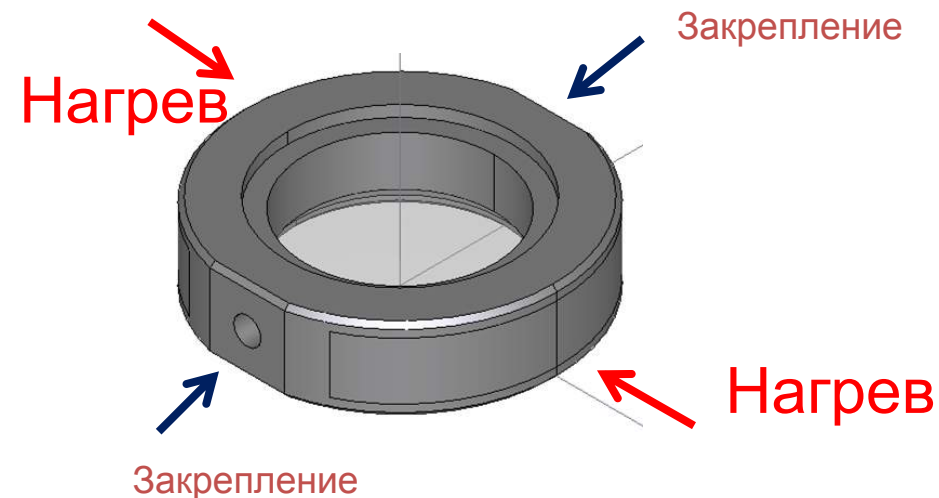
## Экспериментальное подтверждение результатов

- Двояковыпуклая сферическая линза из BK7
- Алюминиевая оправа
- 2 нагревателя, приклеенных к оправе
- 3 термопары на оправе
- Неидеальное взаимодействие между элементами конструкции

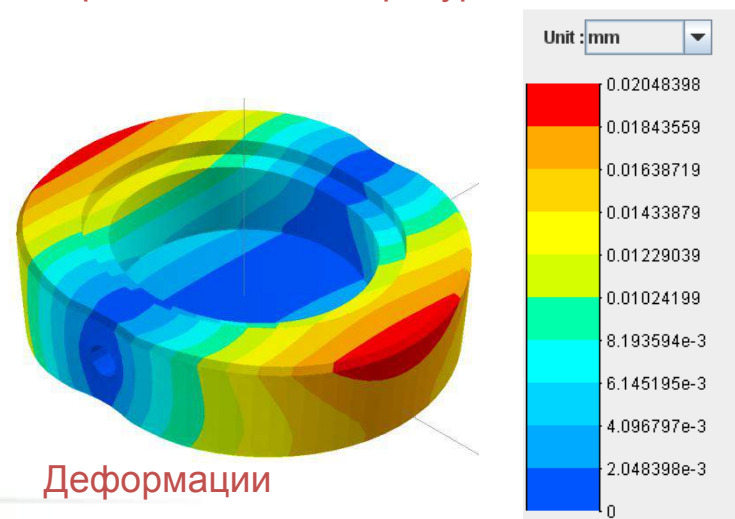


# ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ

## Деформации и напряжения в конструкции под действием термомеханических нагрузок

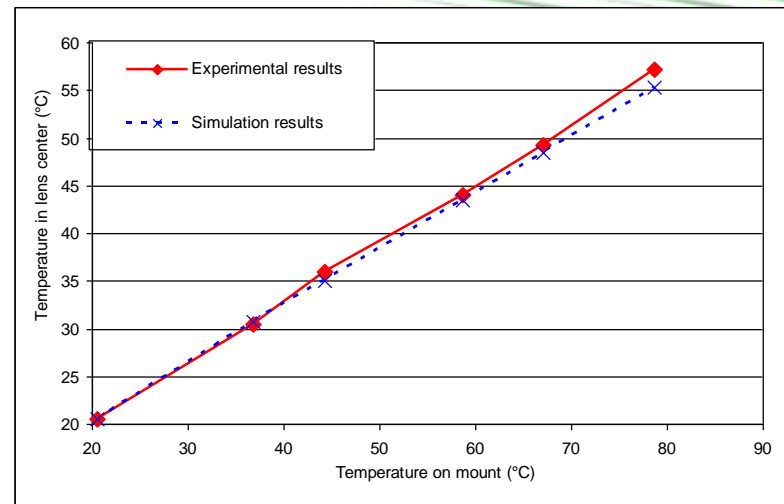
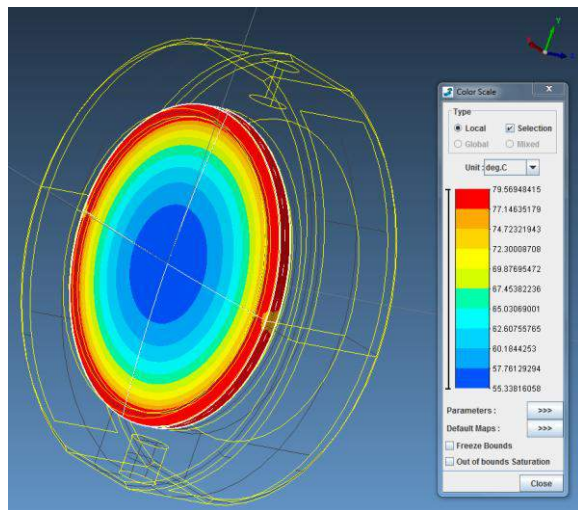


Распределение температур

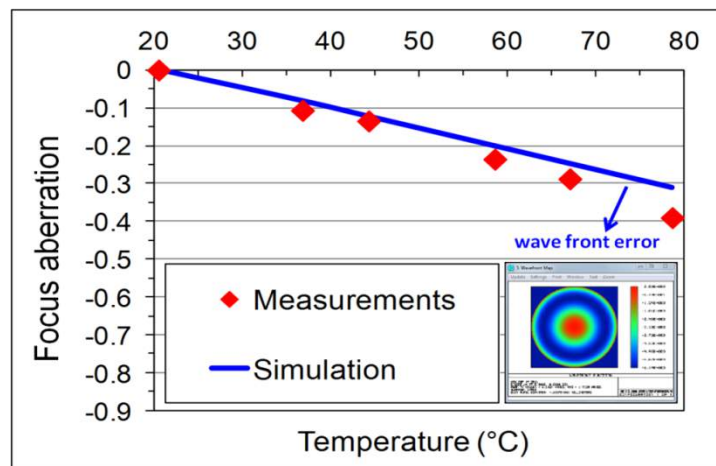


Деформации

# ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ



## Температура внутри линзы – модель и эксперимент



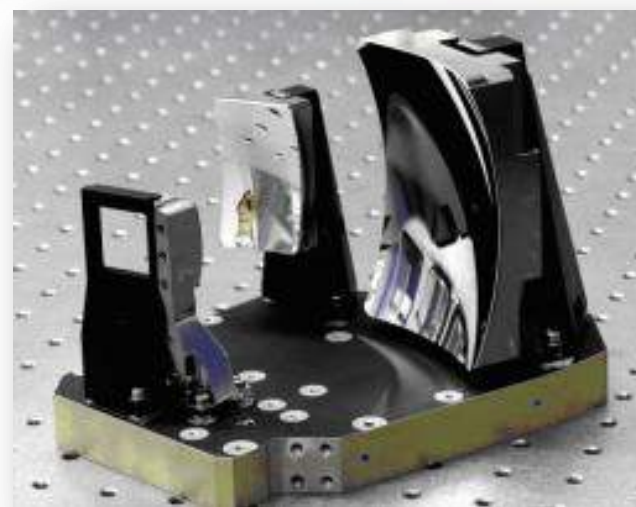
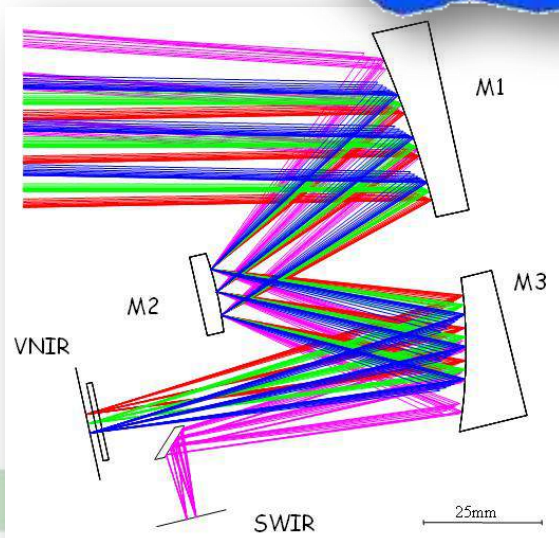
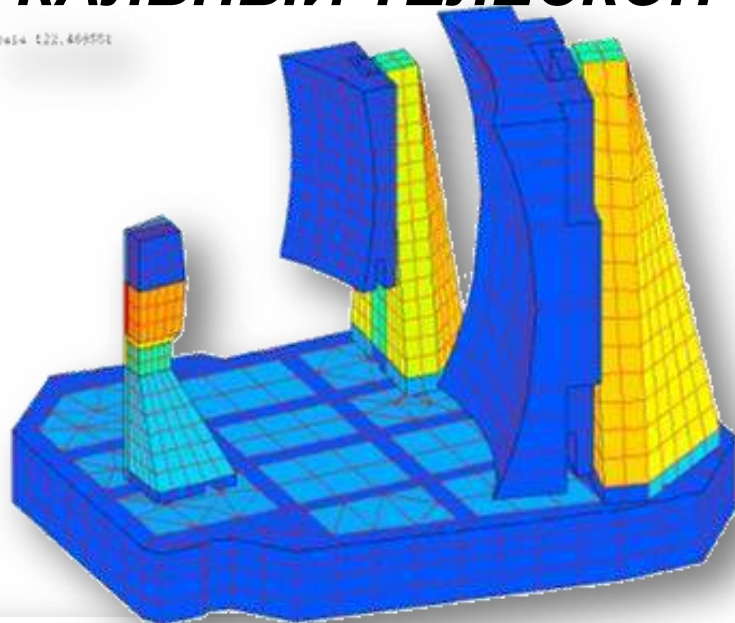
## Фокусная aberrация в системе





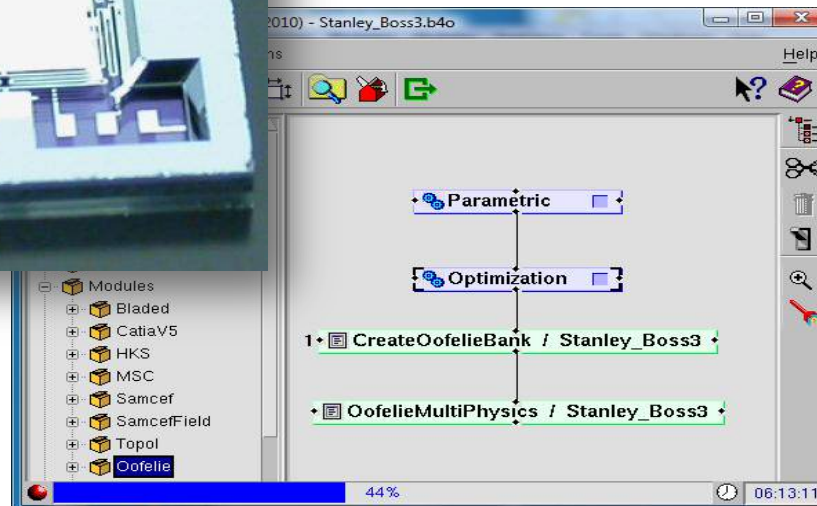
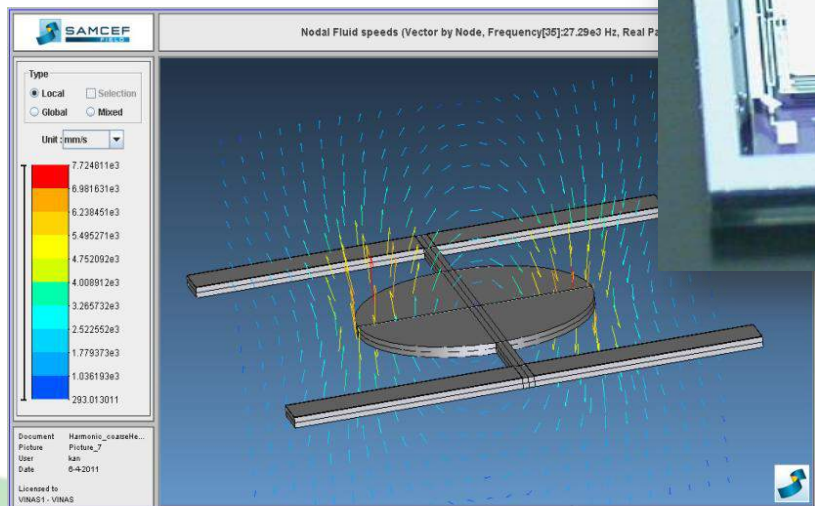
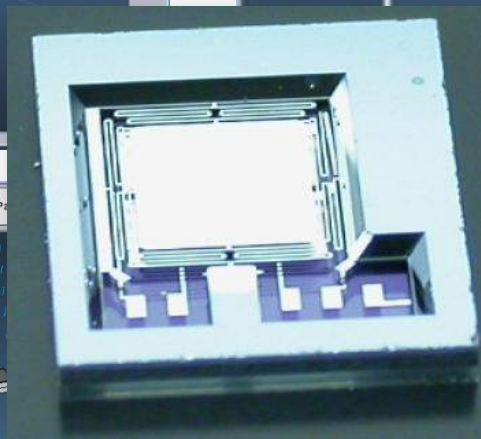
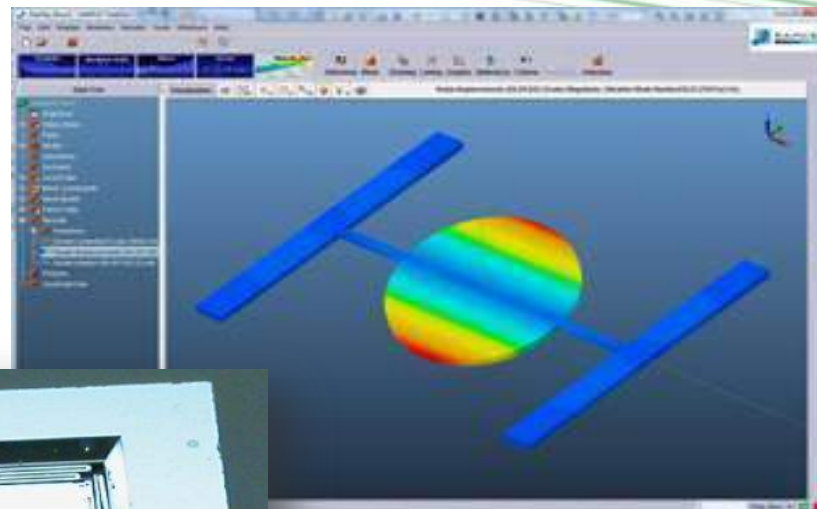
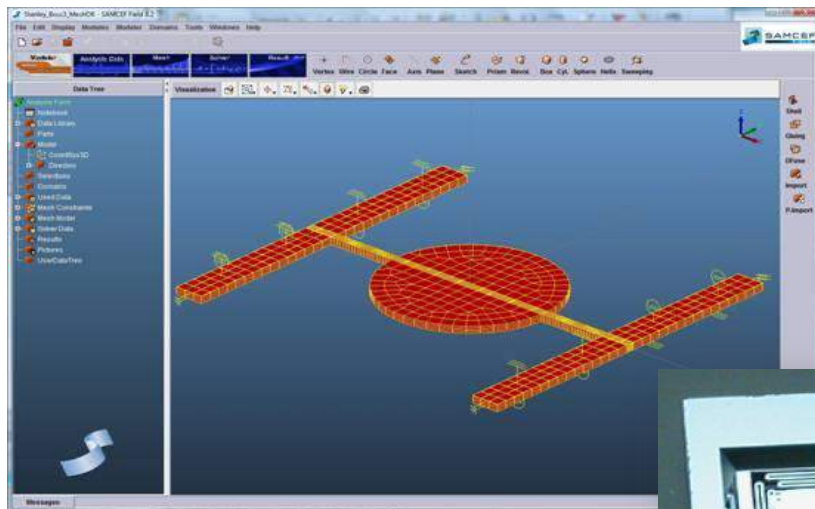
# ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП

00454 122,469501





# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОЗЕРКАЛ

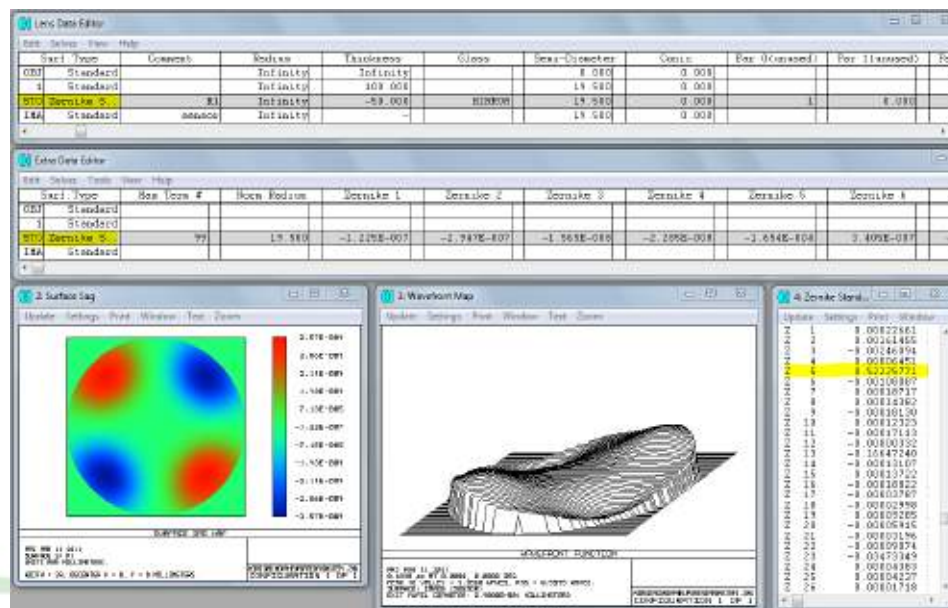
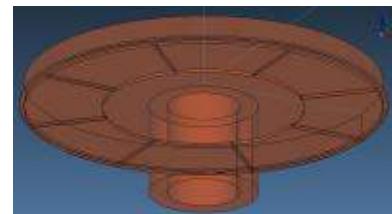
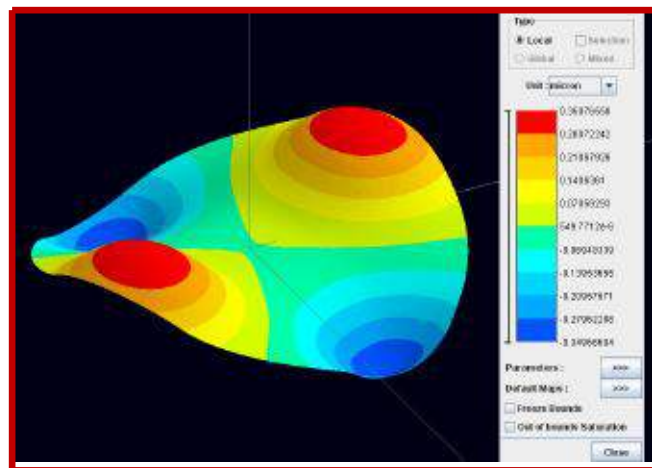


# АДАПТИВНАЯ ОПТИКА

## Моделирование пьезоэлектрических приводов в OOFELIE



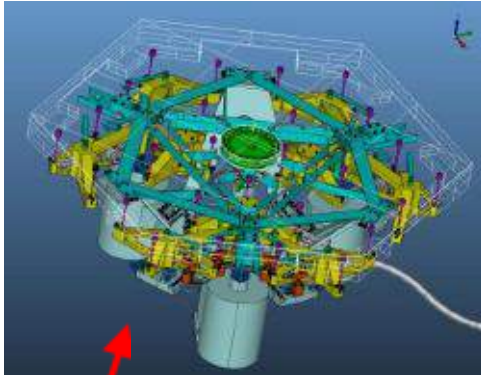
Представление деформаций оптической поверхности в виде разложения по полиномам Цернике в ZEMAX



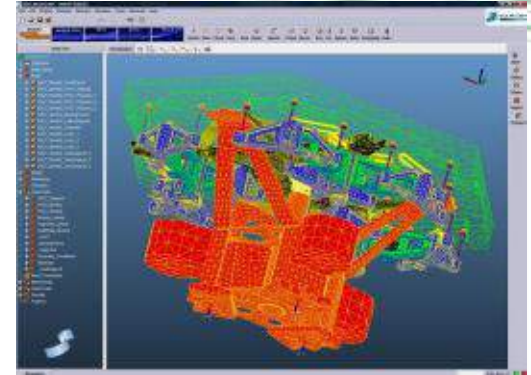


# ГЛАВНОЕ ЗЕРКАЛО E-ELT ТЕЛЕСКОПА

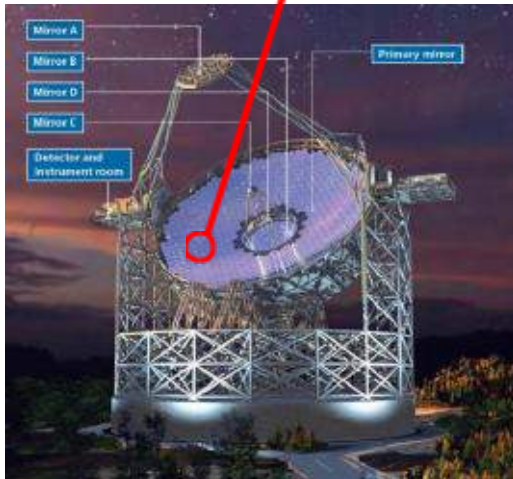
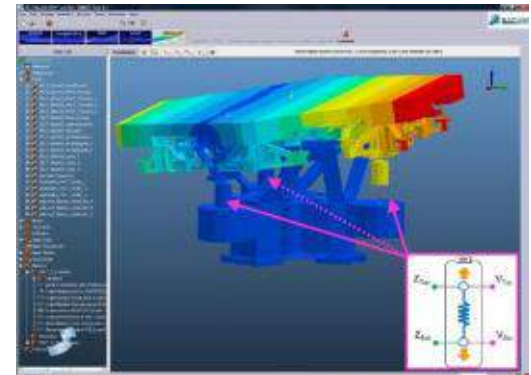
Модель  
одного  
сегмента  
зеркала



Конечно-  
элементная  
модель



Деформация  
зеркала



Предоставлено ESO

**Modelling the Position Control of a Segment of the E-ELT using  
OOFELIE::Multiphysics Integrated FEM-based Approach,**  
Ph. Nachtergaele, L. Gamonal, O. Bruls, ACTUATOR 2012 (Messe Bremen)

## ***ПРЕИМУЩЕСТВА OOFELIE for Advanced Optics***

- ❑ Интеграция с Zemax-EE – автоматический обмен данными между OOFELIE и Zemax
- ❑ Удобный графический интерфейс
- ❑ Широкий спектр возможностей по моделированию оптических систем любых размеров и сложности
- ❑ Возможность совместного использования с другими модулями системы OOFELIE => построение комплексных мультифизических моделей оптических систем



***СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!***

***ВАШИ ВОПРОСЫ?***

