

Балтийский государственный технический университет  
им. Д.Ф.Устинова «ВОЕНМЕХ»

Кафедра лазерной техники и технологий



Выпускная квалификационная работа

---

# Разработка мобильного метеорологического комплекса всепогодного детектирования параметров атмосферы

Выполнил: Ильин М.Ю., гр. М-004  
Руководитель: д.т.н. Борейшо А.С.

Санкт-Петербург  
2015 г.

## Цели и задачи работы

Цель работы – разработка концепции мобильного комплекса всепогодного детектирования параметров атмосферы, описание требуемых характеристик комплекса и исследование нетипичных стратегий сканирования для разночастотных измерительных систем, объединенных единым модулем сканирования.

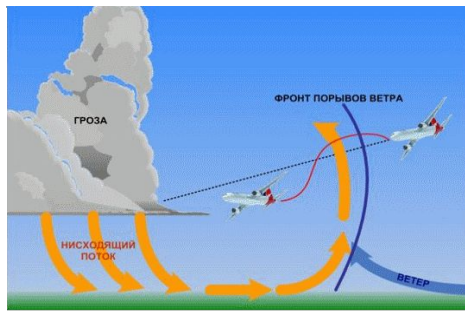
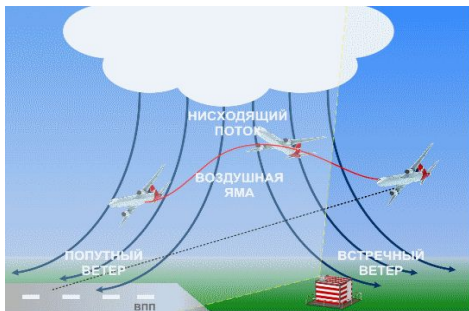
## Задачи

- 1) Обзор современных методов обнаружения сдвигов ветра
- 2) Моделирование измерений на разных частотах. Расчет всепогодности
- 3) Концепция мобильного метеорологического комплекса всепогодного детектирования параметров атмосферы
- 4) Режимов работы комплекса и их рациональная группировка
- 5) Проектирование узла транспортной оптики

## Проблема вихревой безопасности

- На 36-ой сессии Ассамблеи ИКАО в сентябре 2007 г. совет ИКАО постановили, что проблема сдвигов ветра на данный момент является самой серьезной для гражданской авиации

### Виды сдвигов



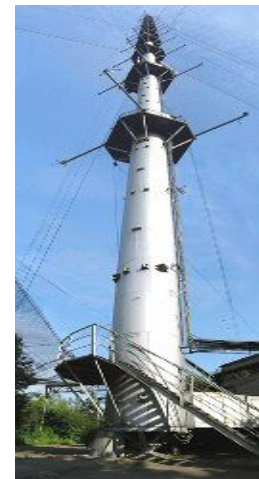
## Способы

### решения

#### 1. КОНТАКТНЫЙ

#### способ

#### Метеомачта



#### 2. Дистанционный

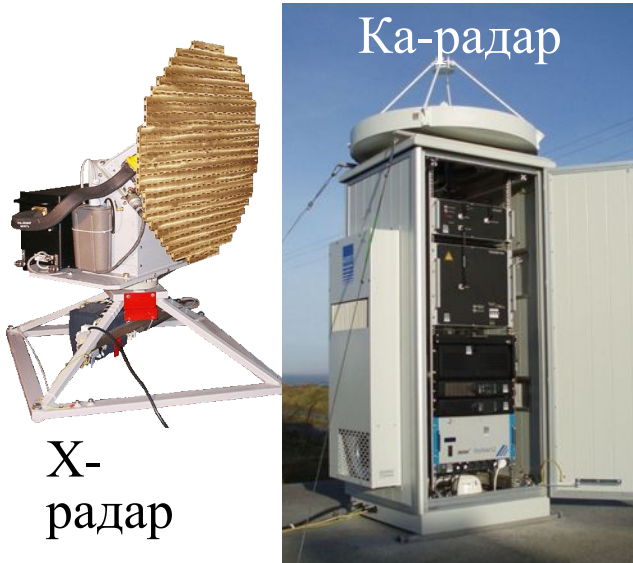
#### способ

#### Ветровой



## Обзор ветровых профиломеров

### Доплеровские радары



- + : большие дальности
- работа в пасмурную/дождливую погоду
- : пропуск приземного слоя
- высокий уровень помех
- не работают в ясную погоду

### Акустические системы ветрового зондирования



- + : высокая разрешающая способность
- : высоты измерений до 1 км
- высокий уровень помех
- сильное затухание

### Доплеровские лидары



- + : высокая разрешающая способность
- работа в ясную погоду
- : не работают в туманах, осадках

## Результат объединения нескольких локаторов



X-радар



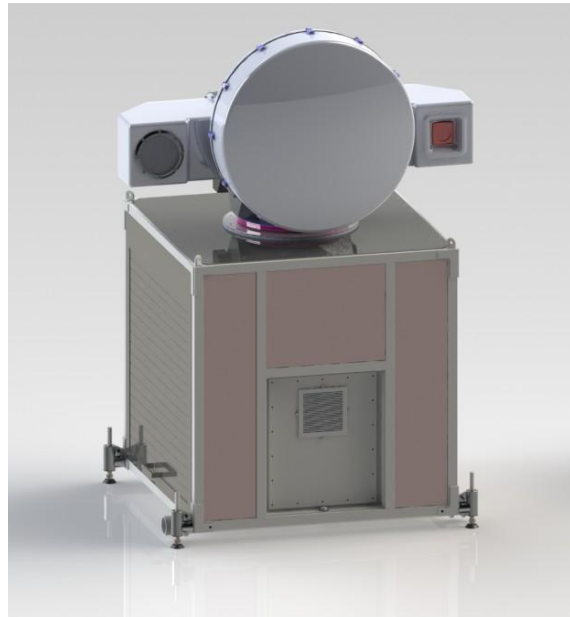
Ка-радар



Лидар



**Всепогодный комплекс**



**ЛИРА**

**Исследования**  
авианавигация, метеорология и  
экология

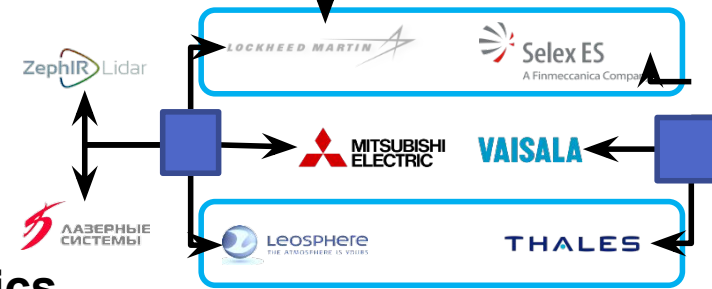
**Обеспечение мет.  
безопасности в  
аэропорту**  
Система шторм-  
оповещения,  
доплеровских радар и  
лидар

**Энергетика**  
Оптимизация ветряных ЭС

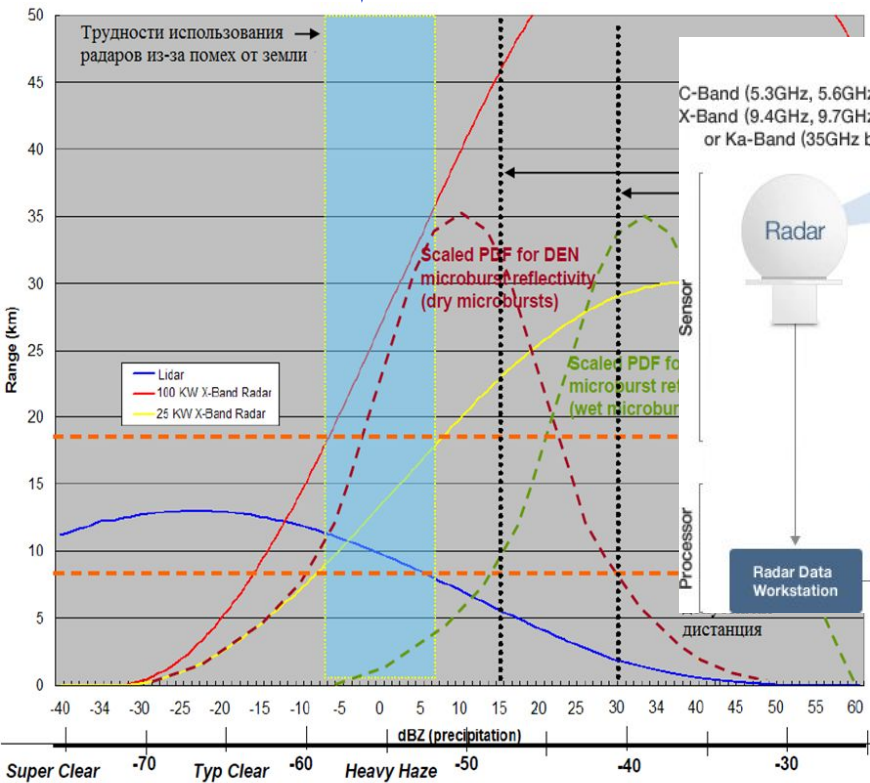


# 1. Обзор современных методов обнаружения сдвигов ветра

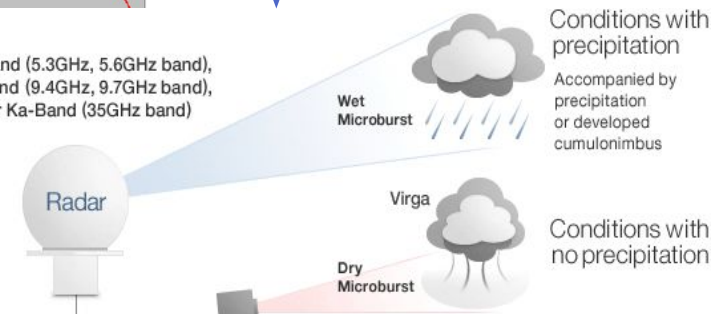
## Аналоги



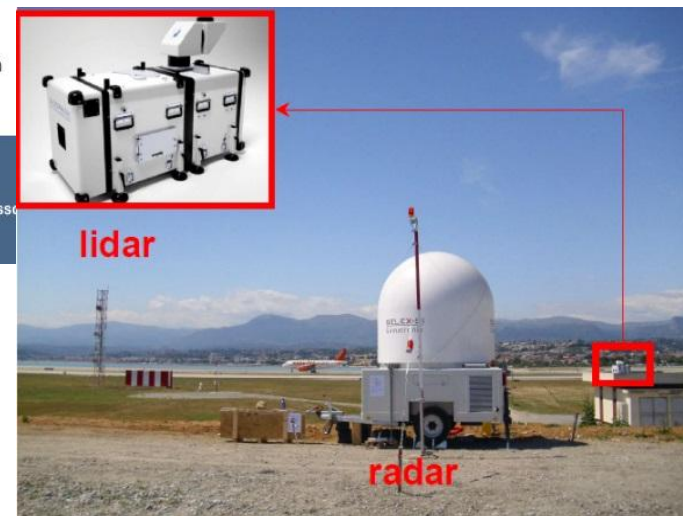
## 1. Концерн Lockheed Martin



## 2. Mitsubishi electronics



## 3. Компания Leosphere



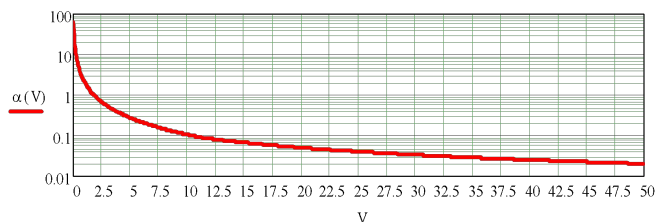
Исследования взаимодействия лидара и X радара в компании Lockheed Martin  
 Синий – лидар «Wind Tracer», Желтый – X радар

## Расчет всепогодности системы

### ИК канал

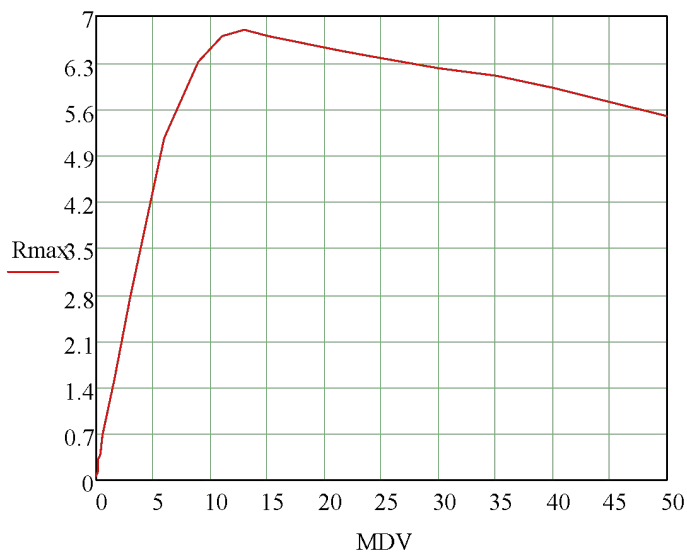
Соотношение коэф. ослабления и МДВ

$$\alpha(V) = \frac{3.91}{MDV} * \frac{550^{\min[1,3; 0.588 * MDV^{1/3}]}}{\lambda}$$



Основное лидарное уравнение

$$Ps(R0) := K \cdot E \cdot c \cdot \beta(R0) \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot \min(D, r0(R0))}{4 \cdot R0^2} \cdot g \cdot e^{(-2 \cdot \alpha(Vr) \cdot \alpha H(R0) \cdot R0)}$$



### X и Ka канал

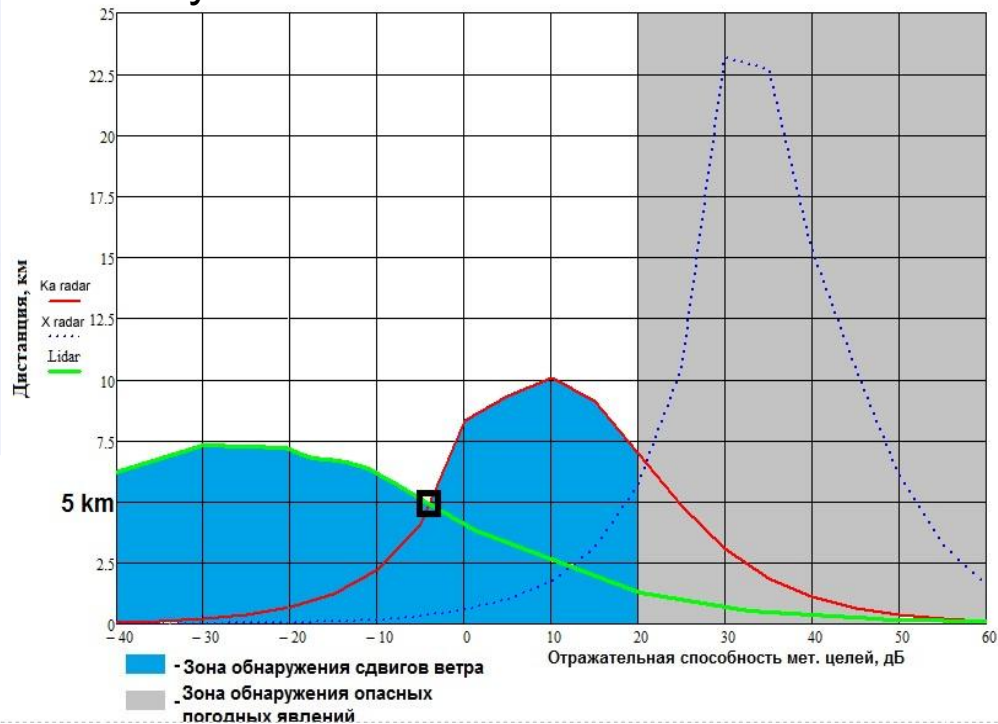
Основное радиолокационное уравнение

$$Pr(R) := \frac{\pi^6 \cdot Pt2 \cdot D2^2 \cdot h2}{48} \cdot \frac{1}{(R)^2} \cdot \frac{1}{\lambda^4} \cdot \text{SumND} \cdot \text{WaterCoeff} \cdot 10^{-0.2 \cdot \frac{R}{10^6} \cdot \alpha t2_0}$$

Эмпирическое отношение между МДВ и dBZ

$$\text{dBZ1} := -13.62 \cdot \ln(\text{MDV}) + 10.80$$

### Результат



# 2. Моделирование измерений на разных частотах. Расчет всепогодности

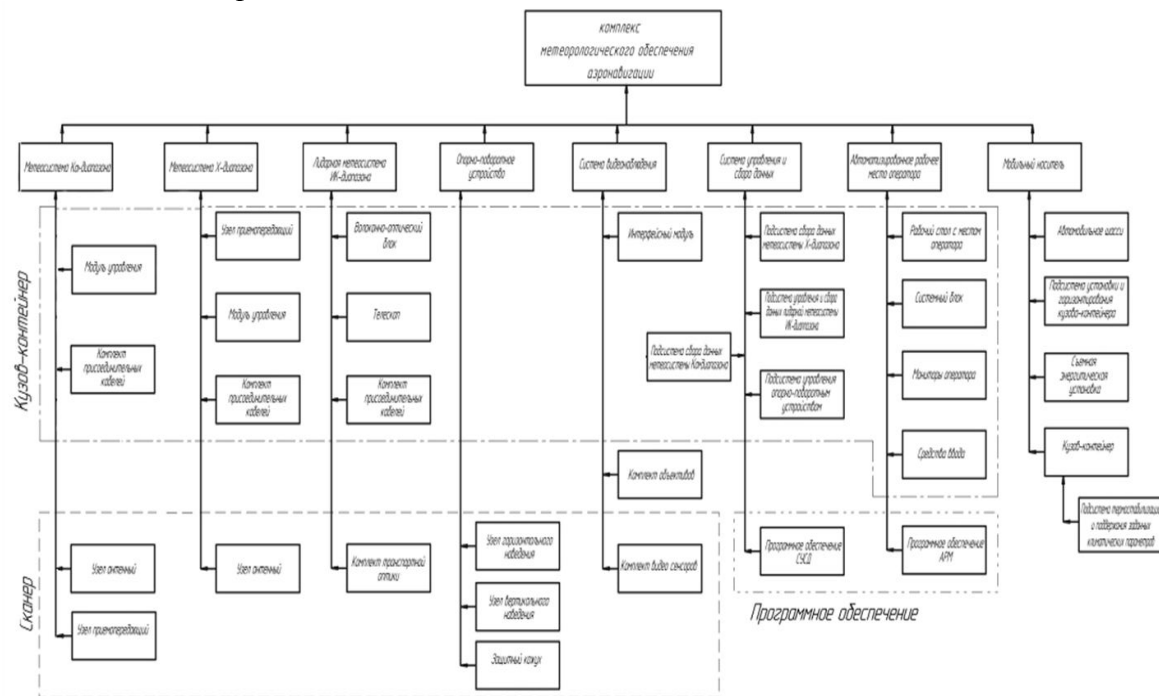
## Характеристики проектируемого метеокомплекса

№	Наименование характеристики	Лира	Лира -2b
1.	Минимальная дистанция измерения скорости ветра	200 м	200 м
	Максимальная дистанция измерения скорости ветра при наихудших погодных условиях для комплекса	5000 м	5000 м
2.	<b>ИК канал</b>		
2.1	Максимальная дистанция измерения скорости ветра (отношение сигнал-шум тройка) при горизонтальной дальности видимости не менее 15 км	6 км	6 км
2.2	Максимальное расстояние обнаружения параметров облачности, не менее	15 км	15 км
2.3	Пространственное разрешение	60-120 м	60-120 м
2.4	Диапазон измерений скоростей ветра	±60 м/с	±60 м/с
2.5	Погрешность измерения скорости ветра	±1 м/с	±1 м/с
3	<b>Х канал</b>		
3.1	Максимальное расстояние обнаружения гроз, (ливней, града, шквала), не менее	50 км	
3.2	Максимальное расстояние определение скорости ветра	25 км	
3.3	Пространственное разрешение	150-600 м	
3.4	Диапазон измерений скоростей ветра	±45 м/с	
3.5	Погрешность измерения скорости ветра	±1 м/с	
4	<b>Ка канал</b>		
4.1	Максимальное расстояние обнаружения параметров облачности, не менее	15 км	15 км
4.2	Максимальное расстояние определение скорости ветра	10 км	10 км
4.3	Пространственное разрешение	60-250 м	60-250 м
4.4	Диапазон измерений скоростей ветра	±45 м/с	±45 м/с
4.5	Погрешность измерения скорости ветра	±1 м/с	±1 м/с
5.	<b>Сканирующая система</b>		
5.1	Вертикальное направление (угол места) <sup>2</sup>	0° ... 90°	0° ... 90°
5.2	Горизонтальное направление (азимут) <sup>2</sup>	0° ... 360°	0° ... 360°
5.3	Максимальная скорость сканирования (установки)	40 °/с	40 °/с
5.4	Максимальное ускорение	5°/с <sup>2</sup>	5°/с <sup>2</sup>
5.5	Точность наведения на подвижный объект	±30'	±30'
6.	Габаритные размеры (максимальные)	1300x170 0x2200 мм <sup>3</sup>	1300x170 0x2200 мм <sup>3</sup>
7.	Вес комплекса (максимальный)	700 кг	600 кг

## Характеристики прием-передающих систем проектируемого метеокомплекса.

	<b>Х-радар</b>	<b>Ка-радар</b>	<b>ИК-лидар</b>	
<b>Тип передатчика</b>	Магнетрон	Клистрон	Волоконный лазер	<b>Тип лазера</b>
Частота, МГц	9345±30	37.5±0,1	1560±15	Длина волны, нм
Пиковая мощность, Вт	100	400-5000	100	Энергия в импульсе, мкДж
Длительность импульса, мкс	1 - 10	0.2-0.8	0.4-0.8	Длительность импульса, мкс
Частота повторения импульсов, Гц	500-2000	500-3000	25-10	Частота повторения импульсов, КГц
<b>Тип антенны</b>	ВЦР	ВЦР	Телескоп с двухкоординатным сканером	<b>Тип телескопа</b>
Диаметр антенны, мм	760	250	150	Диаметр луча, мм
Уровень боковых лепестков, дБ	-25	-27	-	
Коэффициент усиления антенны, дБ	35	≥38.5	≥35	CMRR, дБ
<b>Тип приемника</b>	dual-channel digital	dual-channel digital	Balanced Amplified Photodetectors	<b>Тип приемника</b>
Динамический диапазон, дБ	≥65	> 70	-	
Коэффициент шума, дБ	4	4.5	3.5	NEP, pW/√Hz

## Схема деления трехдиапазонного комплекса





## 3 –х диапазонный комплекс «ЛИРА»

Наименования	Характеристики
Дистанция определения скорости ветра	от 60 до 22 000 м
Максимальная дистанция определения погодных условий	от 35 000 м
Диапазон измерений скорости ветра	от 1 до 45 м/с
Время обновления информации	от 5 до 300 сек (зависит от режима сканирования)
Пространственное разрешение	от 50 м
Состав	X-радар, Ка-радар, ИК лидар.
Режимы сканирования	VAD, DBS, RHI, PPI.
Вес	400 кг+ вес автомобиля
Габариты	1200x1500x2100 мм (без автомобиля)



## 2 –х диапазонный комплекс «ЛИРА» (без системы шторм-оповещения)



Наименования	Характеристики
Дистанция определения скорости ветра	от 60 до 5000 м <u>в любую погоду</u>
Диапазон измерений скорости ветра	от 1 до 45 м /с
Время обновления информации	от 5 до 300 сек (зависит от режима сканирования)
Пространственное разрешение	от 50 м
Состав	Ка-радар, ИК лидар.
Режимы сканирования	VAD, DBS, RHI, PPI.
Вес	200 кг
Габариты	1200x1800 мм

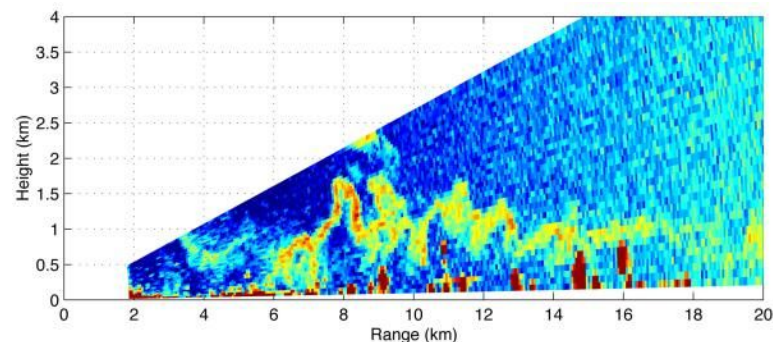
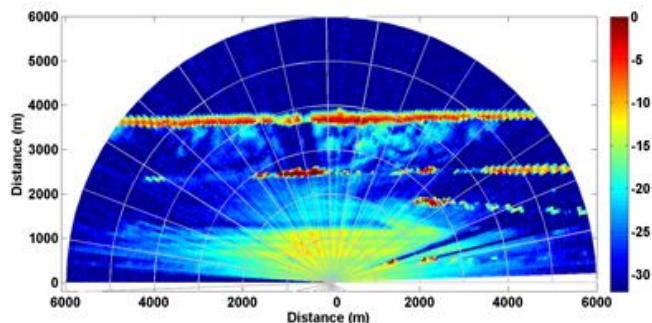
### Объединение проступающих данных

Разные режимы сканирования:  
VAD, DBS, RHI, PPI

Максимальный период обновления  
метеорологической информации = 5 мин.

Характерные углы места  
сканирования лидара – 1-86°  
Место установки –  
геометрический центр ВПП.

Характерные углы места  
сканирования радара – 3-56°  
Место установки –  
за территорией аэропорта.



## Способ подбора рациональной стратегии сканирования

### Шаг 1.

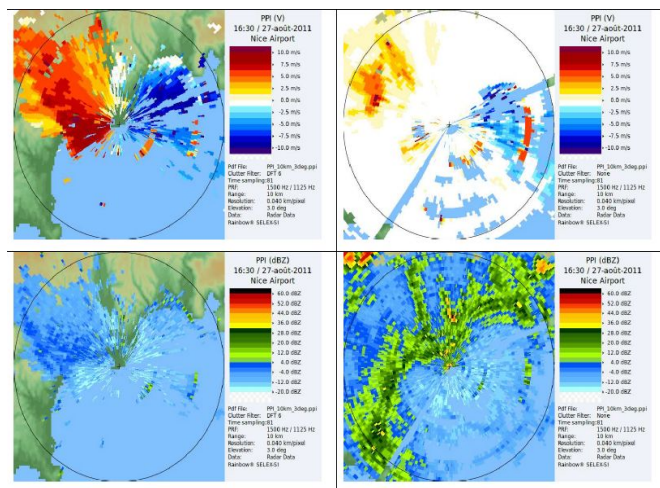
- Подбор сканирующих углов
- Определение оптимальных ЧПИ
- Решение об использовании медианных фильтров

### Шаг 2.

- Определение скорости вращения антенны
- Решение об использовании Доплер и эхо фильтров

### Шаг 3.

- Анализ данных на коротких дистанциях в различных погодных усл.
- Окончательный выбор последовательности режимов сканирования

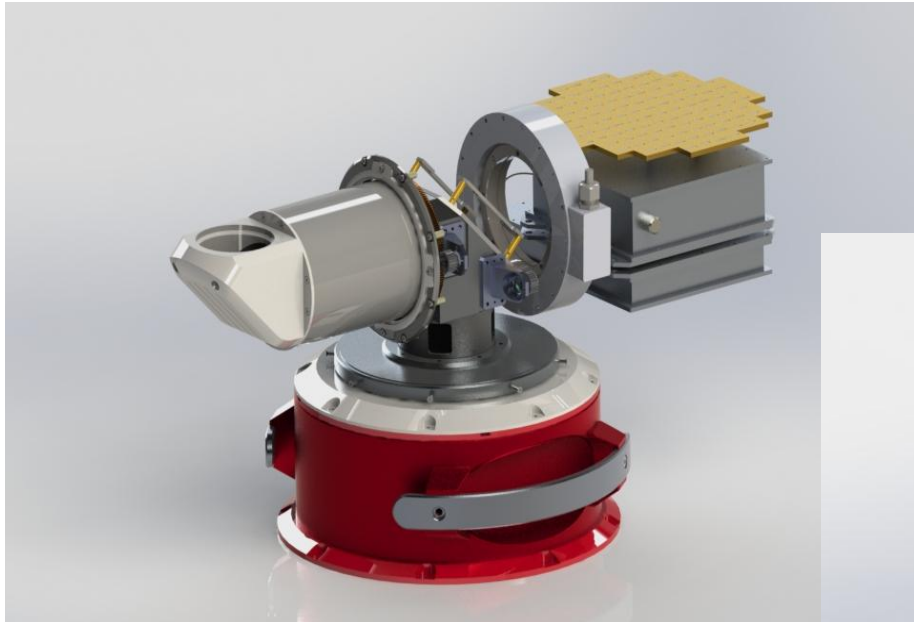


Результат подбора

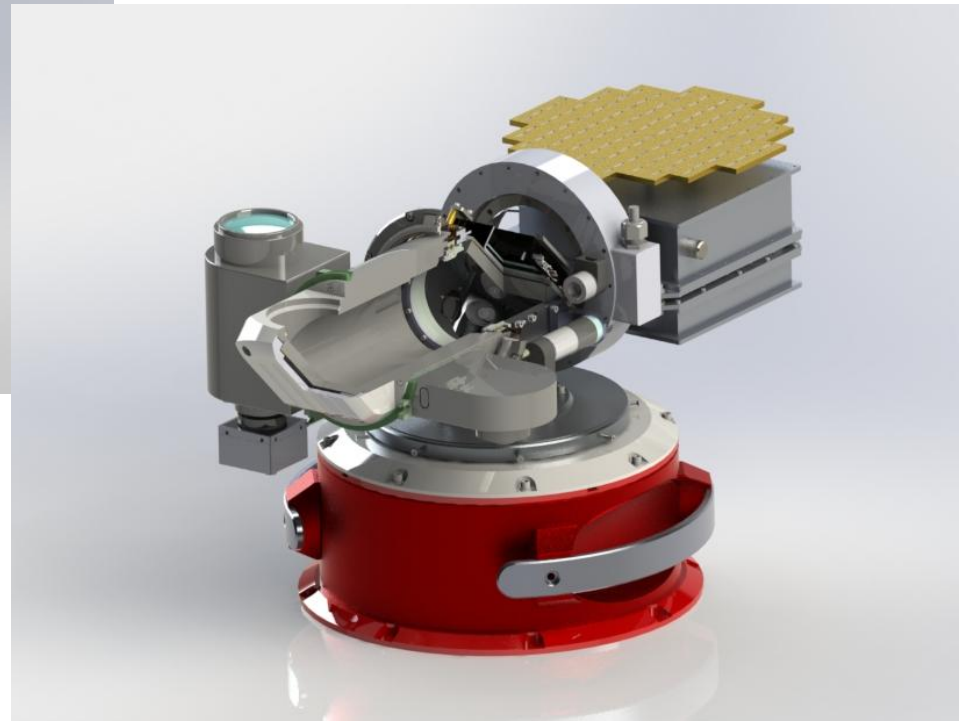
№	ROT, °/с	Зенит °	Азимут °	ЧПИ1 Гц	ЧПИ2 Гц	Найквис Т м/с	Угл. разреш °	Макс. дист. км
<b>PHI</b>	6	1-179	44	2000	1333	32.1	0.3	75
<b>1</b>	16	1	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>2</b>	16	2	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>3</b>	16	3	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>4</b>	16	7	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>5</b>	16	12	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>6</b>	16	18	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>7</b>	16	25	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>8</b>	16	35	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>9</b>	16	3	/	2000	1333	32.1	1	75
<b>10</b>	16	50	/	2000	1333	32.1	1	75

Эскизная разработка модуля сканирования на базе WINDEX-5000

Вариант 1.

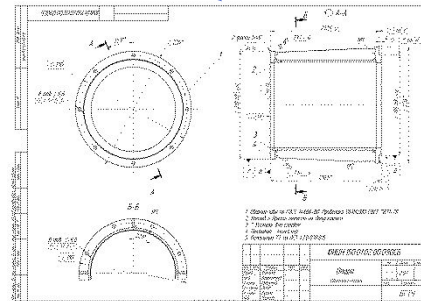
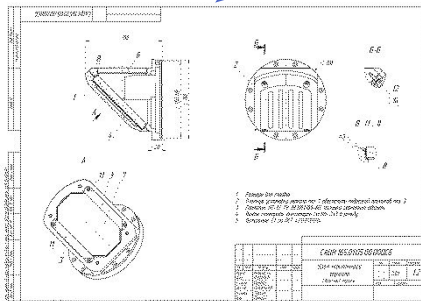
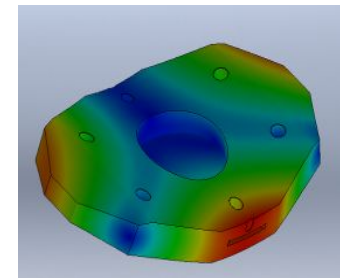
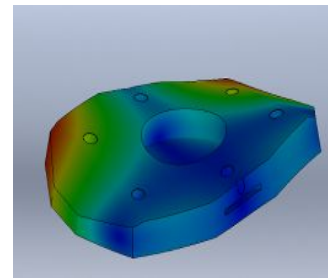
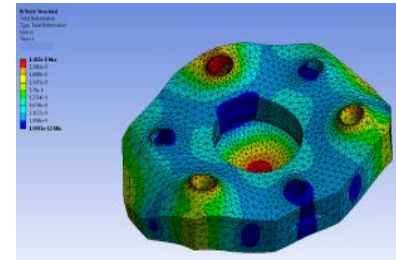
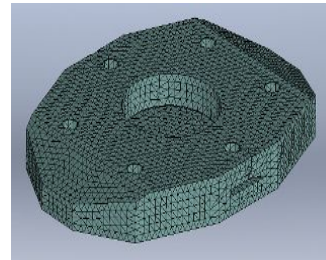
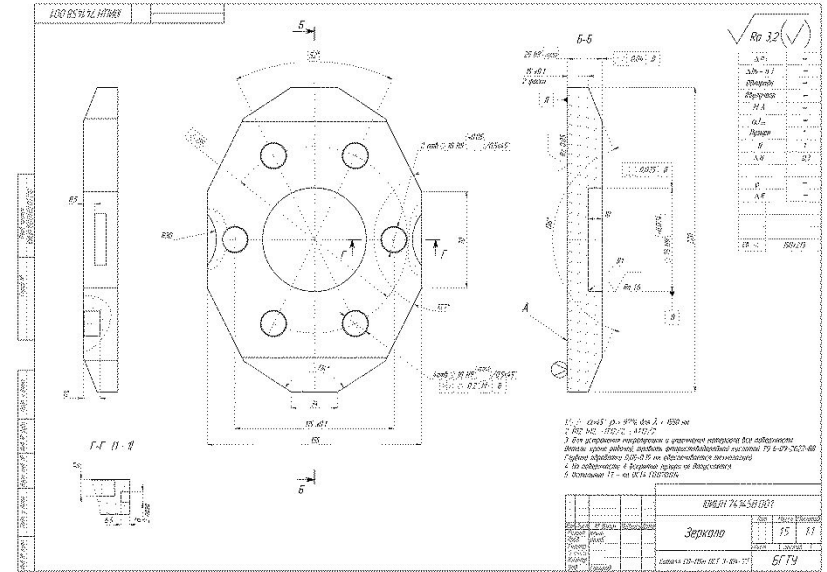
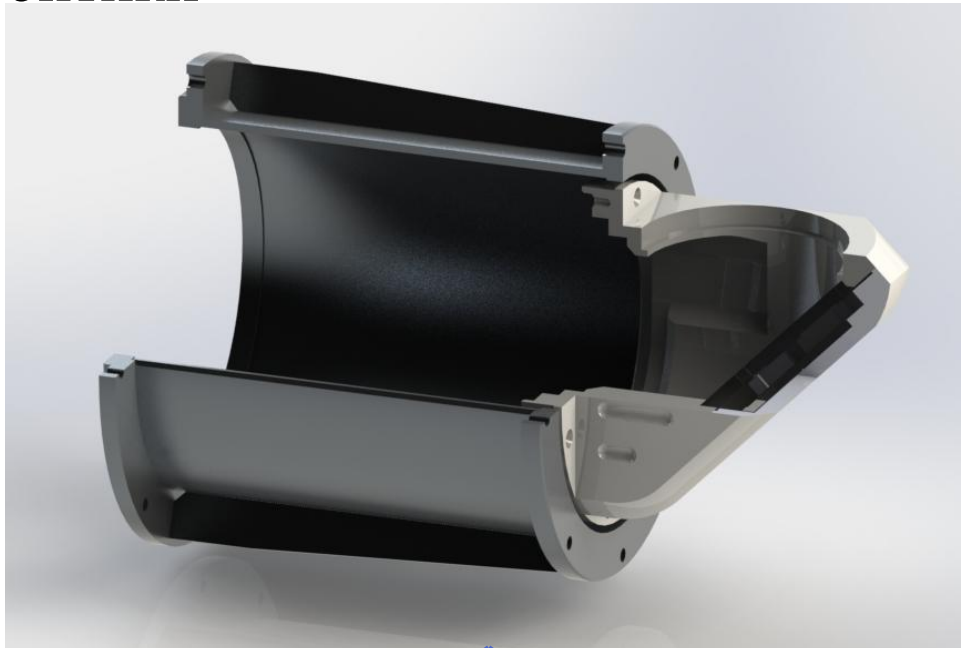


Вариант 2.



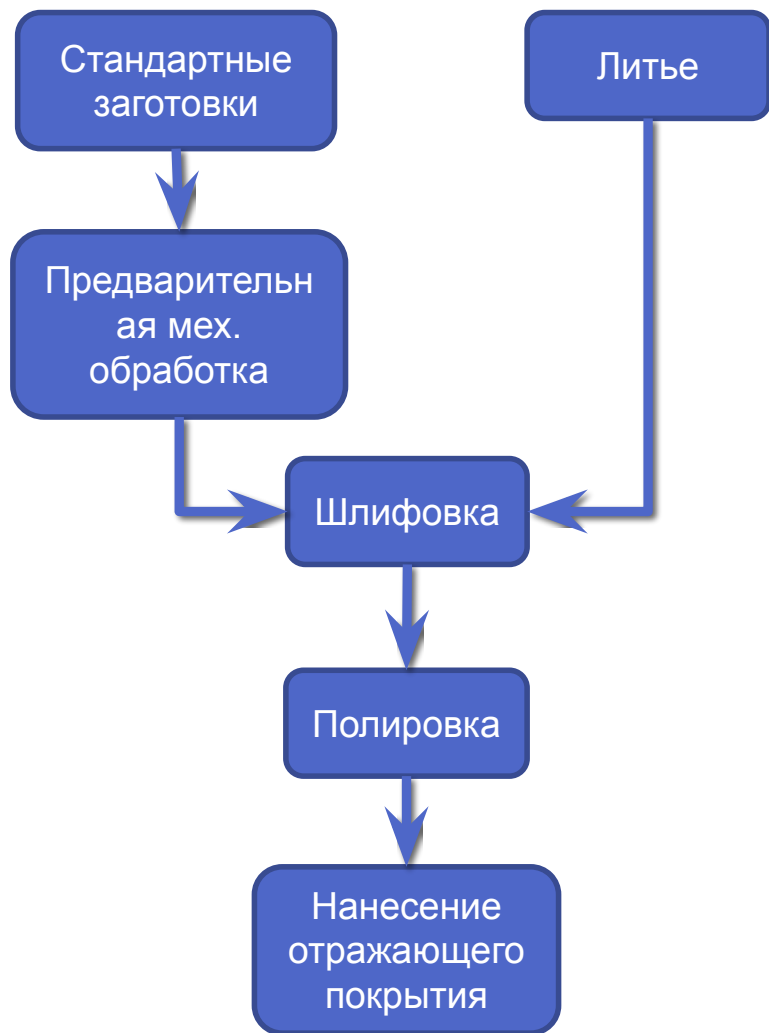


# Проектирование узла транспортной оптики



# Технологический раздел

## Схема изготовления зеркала



## Маршрутная карта изготовления зеркала

Операции	Содержание операции
<b>Распиливание</b>	Наклеивание или сжатие исходных заготовок. Станок типа ПК-400. Обрабатывающий инструмент – алмазный отрезной круг
<b>Грубое шлифование плоскостей</b>	Наклеивание или свободная установка заготовок в металлическом сепараторе. Станок типа ПМШ-100. Обрабатывающий инструмент – чугунная планшайба.
<b>Грубое шлифование боковых поверхностей</b>	Склеивание заготовок в столбик и обработка вручную. Обрабатывающий инструмент – чугунная планшайба.
<b>Круглое шлифование боковых поверхностей</b>	Склеивание заготовок в столбик или соединение через слой бумаги в центрах. Круглошлифовальный станок типа 3В-10. Обрабатывающий инструмент – алмазный плоский круг
<b>Фрезерование пазов</b>	Сжатие заготовки в приспособлении. Горизонтальнофрезерный станок типа 6Н82. Обрабатывающий инструмент – алмазный круг фасонного профиля
<b>Сверление отверстий</b>	Наклеивание заготовок или сжатие в приспособлении сверлильного станка. Обрабатывающий инструмент – стальное зубчатое сверло, шлифовальник. Шлифовальный порошок
<b>Тонкое шлифование и полирование рабочих поверхностей.</b>	Наклеивание (эластичное) заготовок на приспособление от одной установочной базы. Станок типа ШП. Обрабатывающий инструмент – металлическая планшайба и смоляной полировальник. Микропорошок М20, М10 или М7
<b>Доводка плоскостей, параллельность сторон и углов</b>	Свободная усадка заготовок в стеклянном сепараторе. Станок типа ПД. Обрабатывающий инструмент – смоляной полировальник. Абразив – полирит. Средства контроля – интерферометр, автоколлиматор.
<b>Нанесение отражающего покрытия</b>	Свободная усадка заготовок на подложку. Станок типа ВУ. Напыляющий материал – золото. Средства контроля – интерферометр, автоколлиматор.

## Расчет затрат на сборку и проведение исследований

Расчет себестоимости :

$$C = C_P + C_{Т.К.} + C_{С.Н.} + C_{А.С.} + C_{ПР.}$$

$C_P$  – заработная плата (основная и дополнительная) работников;

$C_{Т.К.}$  – затраты на технологические компоненты лидарной системы;

$C_{С.Н.}$  – отчисления на социальные нужды;

$C_{А.С.}$  – амортизация оборудования;

$C_{ПР.}$  – прочие расходы.

Общая смета затрат на разработку макетного образца			
№	Наименование	Сумма, тыс. руб.	%
1	Зарплата персонала	7 986	36,83
2	Страховые взносы	2 395,8	11,05
3	Материальные затраты (электроэнергия, вспомогательные материалы)	659,88	3,05
4	Технологические компоненты	9 682	44,65
5	Прочее	958,32	4,42
	ИТОГО:	21 682	100

Затраты на сборку комплекса «ЛИРА» 2b и на проведение с ее помощью исследований в течение 1 года составляют 21 682 000 рублей.

# Охрана труда и окружающей среды

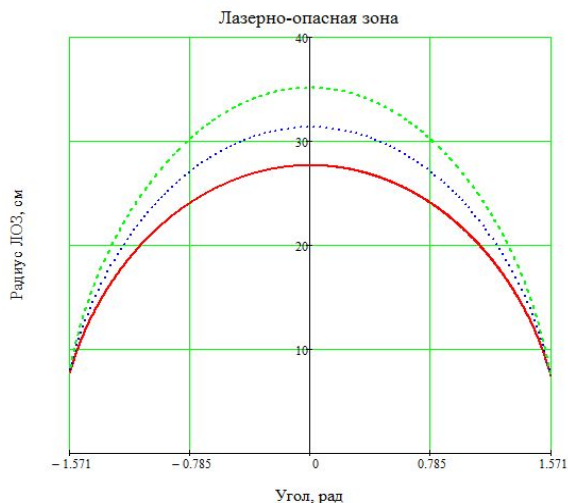


## Класс опасности лазерного излучения

Режим	Средняя мощность	Класс опасности
Импульсный	25 мВт	I
	50 мВт	I

## Расчет границ лазерно-опасной зоны (запуск уст.)

(для Er волоконного лазера  
E=100мкДж и  $t_{имп}=400$  нс)



Мероприятия по  
обеспечению  
профилактики защиты от  
лазерного излучения

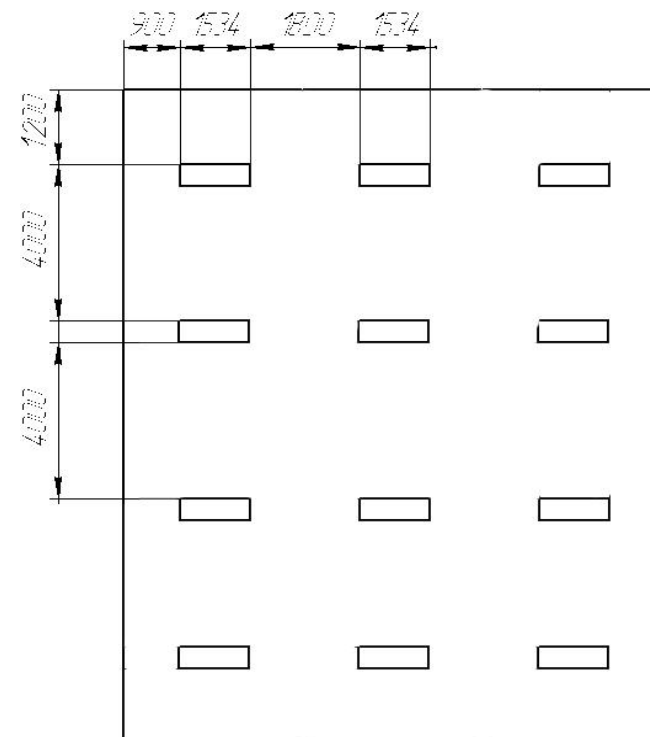


## Пожарная профилактика помещения

- В соответствии со СП 12.13130. 2009 и НПБ 105-03:
- Класс пожара – Е
  - Категория помещения – Г ( $S_1 \geq 100$  м<sup>2</sup>)
  - Первичные средства: - (ОП) – 5л/4кг – 2 шт;  
- (ОУ) – 5л/3кг – 2 шт;



## Расчет искусственного освещения



## Апробация работы

1. Статья в сборнике XXIX Симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред»  
«Лидарно-радиолокационный комплекс для определения профиля ветра в пограничном слое атмосферы» Г.Г. Щукин, А.С. Борейшо, В.Ю. Жуков, М.Ю. Ильин
2. Доклад на 6-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики»  
«Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс» Г.Г. Щукин, А.С. Борейшо, В.Ю. Жуков, М.Ю. Ильин, М.А. Коняев
3. Заявка на патент РФ «Лидарный двухдиапазонный комплекс метеорологического обеспечения навигации»



## ВЫВОДЫ

- Проведен обзор современных методов обнаружения сдвигов ветра
- Произведено моделирование измерений на разных частотах. Рассчитаны характеристики приемо-передатчиков разных каналов.
- Разработана концепция мобильного метеорологического комплекса всепогодного детектирования параметров атмосферы
- Проведено исследование режимов работы комплекса и их рациональная группировка
- Спроектирован узел транспортной оптики

Благодарю за внимание!