

Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением  
с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных



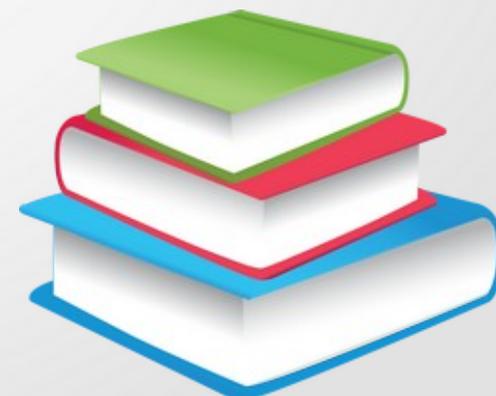
**Богатырев Даниил Иванович,**  
инженер лаб. №1, 1998

Применение алгоритмов управления и  
фильтрации в задачах геофизики

За 2021 г.

1 статья – соавтор

2 доклада – соавтор

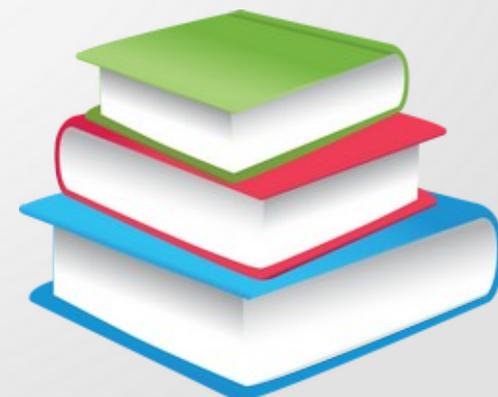


Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

## Применение алгоритмов управления и фильтрации в задачах геофизики

Внедрение алгоритмов комплексирования навигационных и геофизических данных при решении обратных задач геофизики

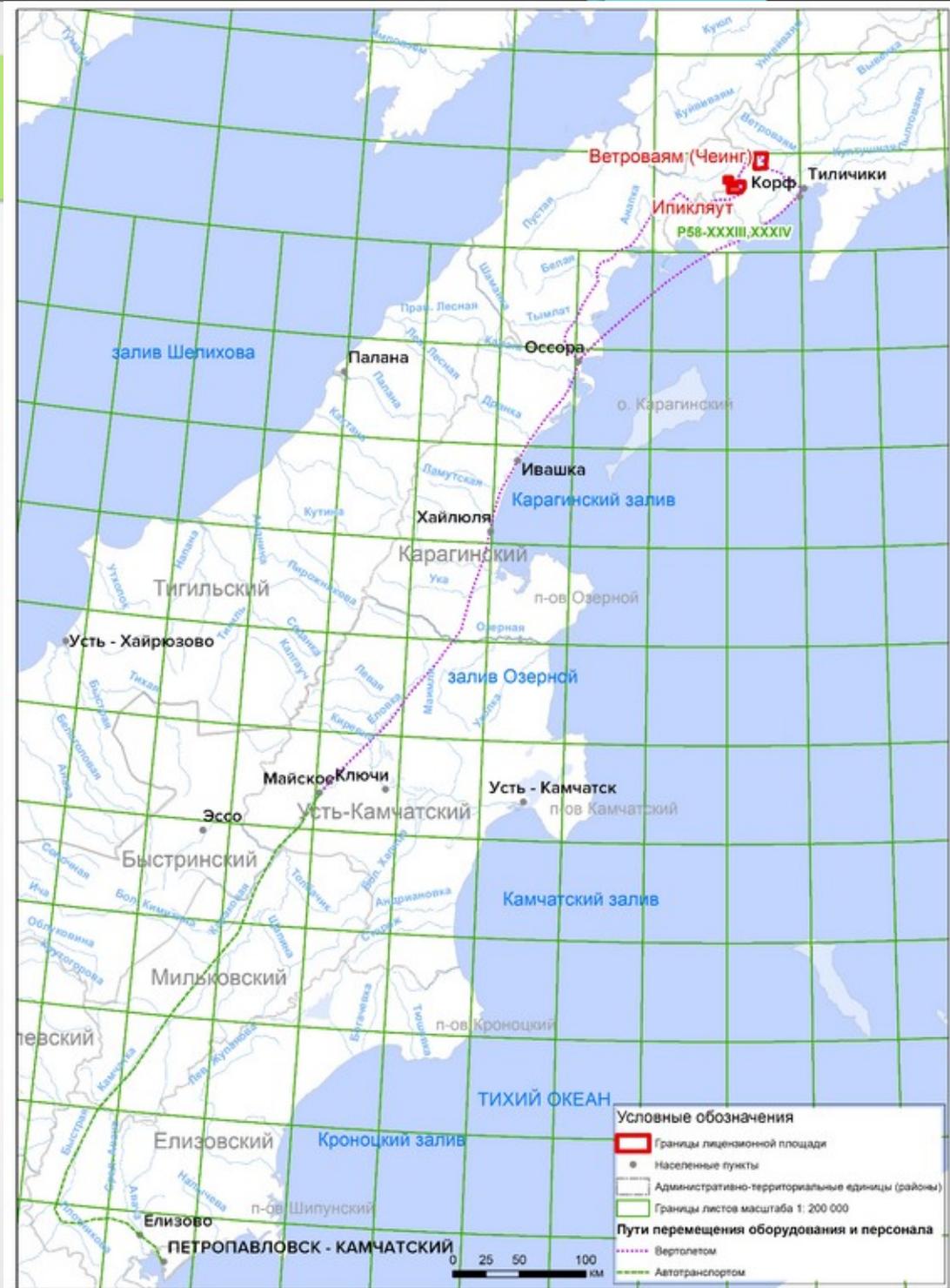
Постановка 1D обратной задачи аэроэлектроразведки:



## Поиск гидротермальных золоторудных месторождений. Камчатка. 2021 г.

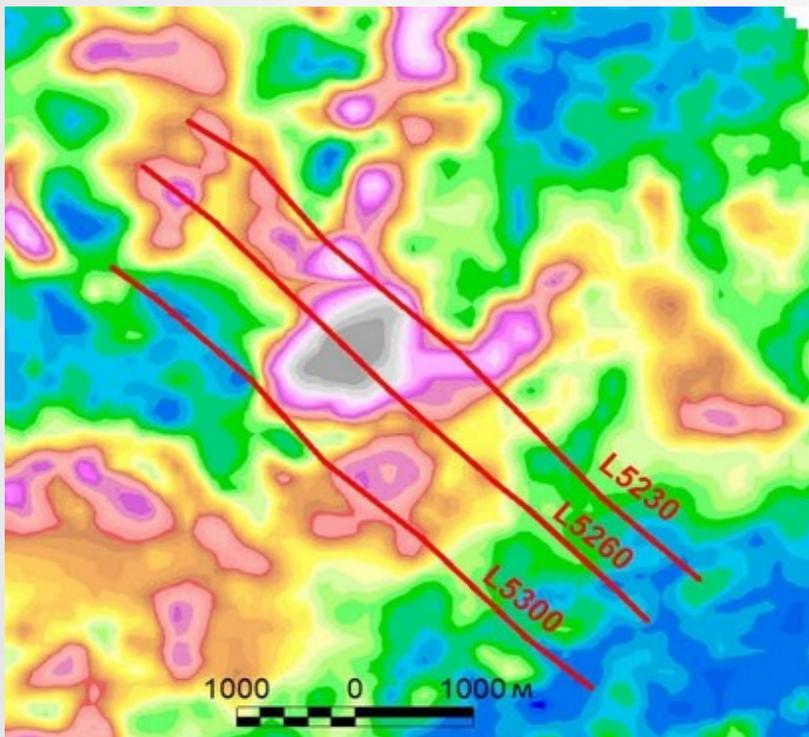
### Обзорная схема района работ

- Оконтурены области присутствия вторичных кварцитов и монокварцитов.
- Выявлены контуры слепых магнитных интрузий, перспективных на обнаружение Cu-Au месторождений порфирирового типа.

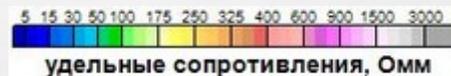
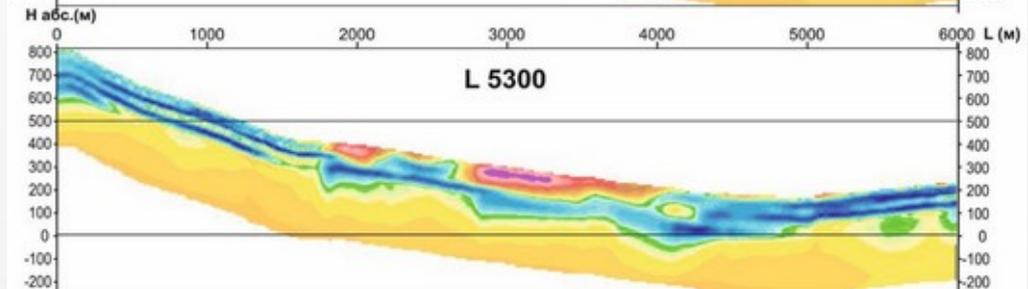
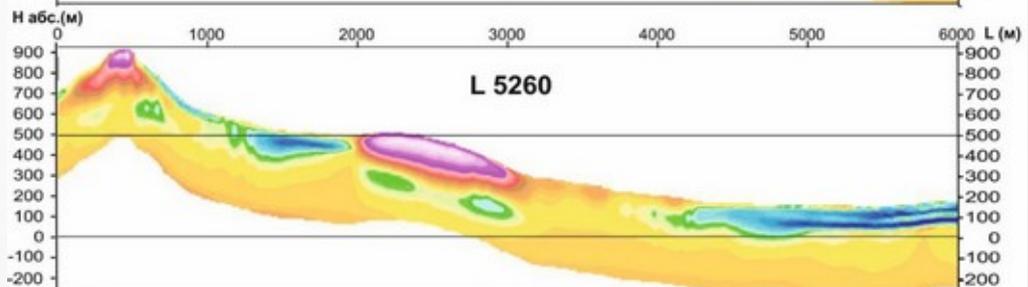
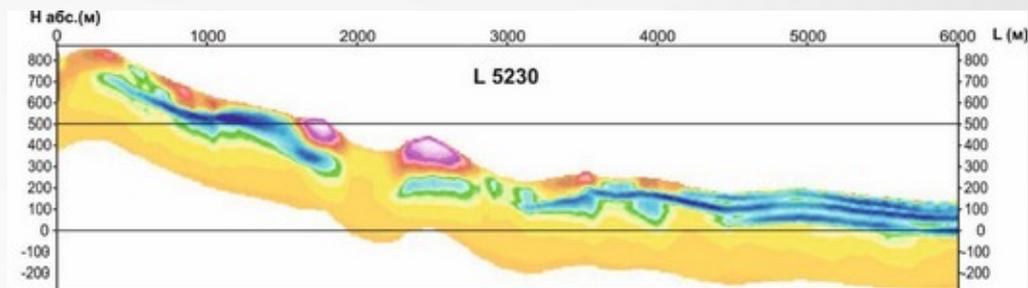


# Поиск гидротермальных золоторудных месторождений. Камчатка. 2021 г.

Карта удельных сопротивлений для интервала глубин 0-50 м.

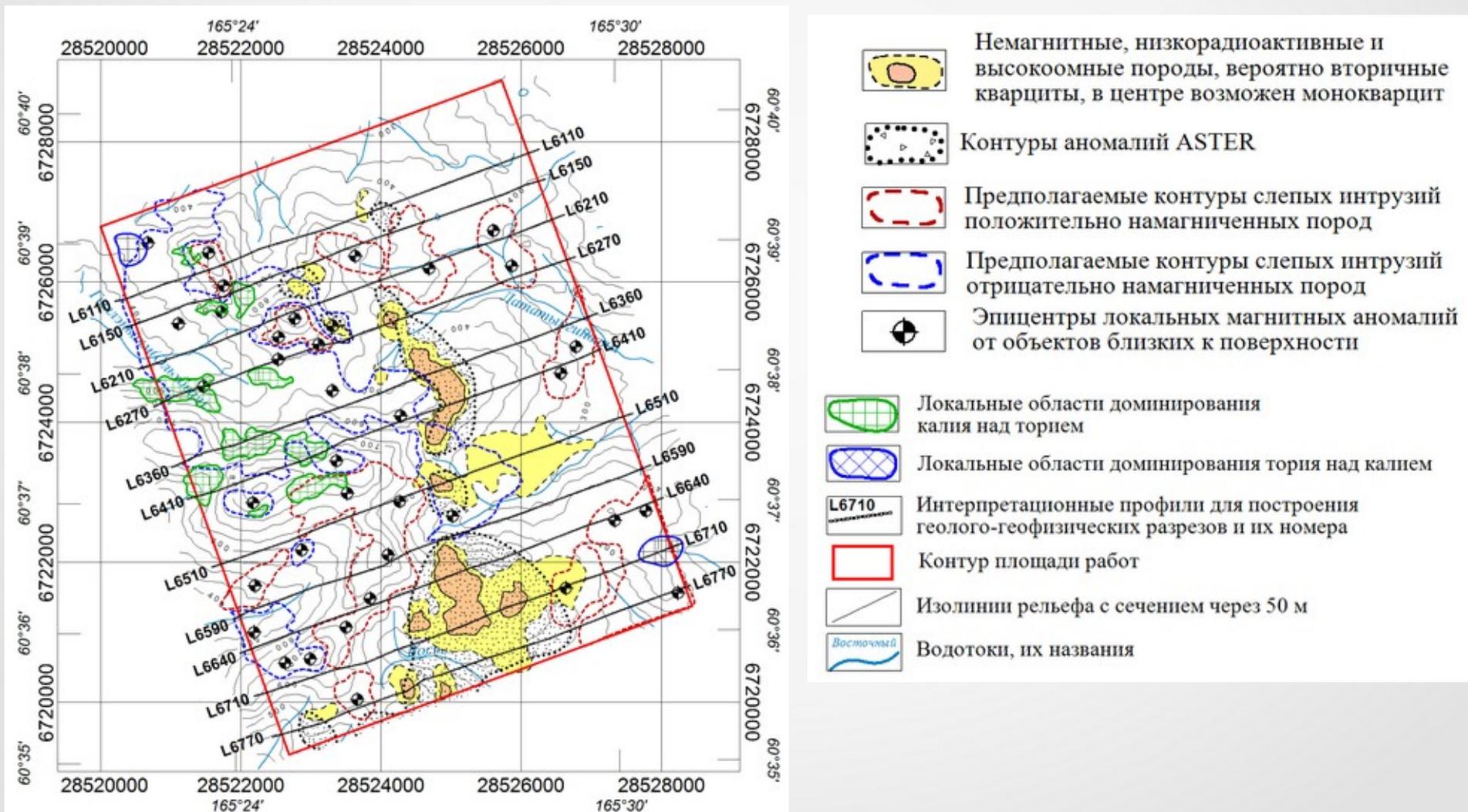


Геоэлектрические разрезы (1-D инверсия)



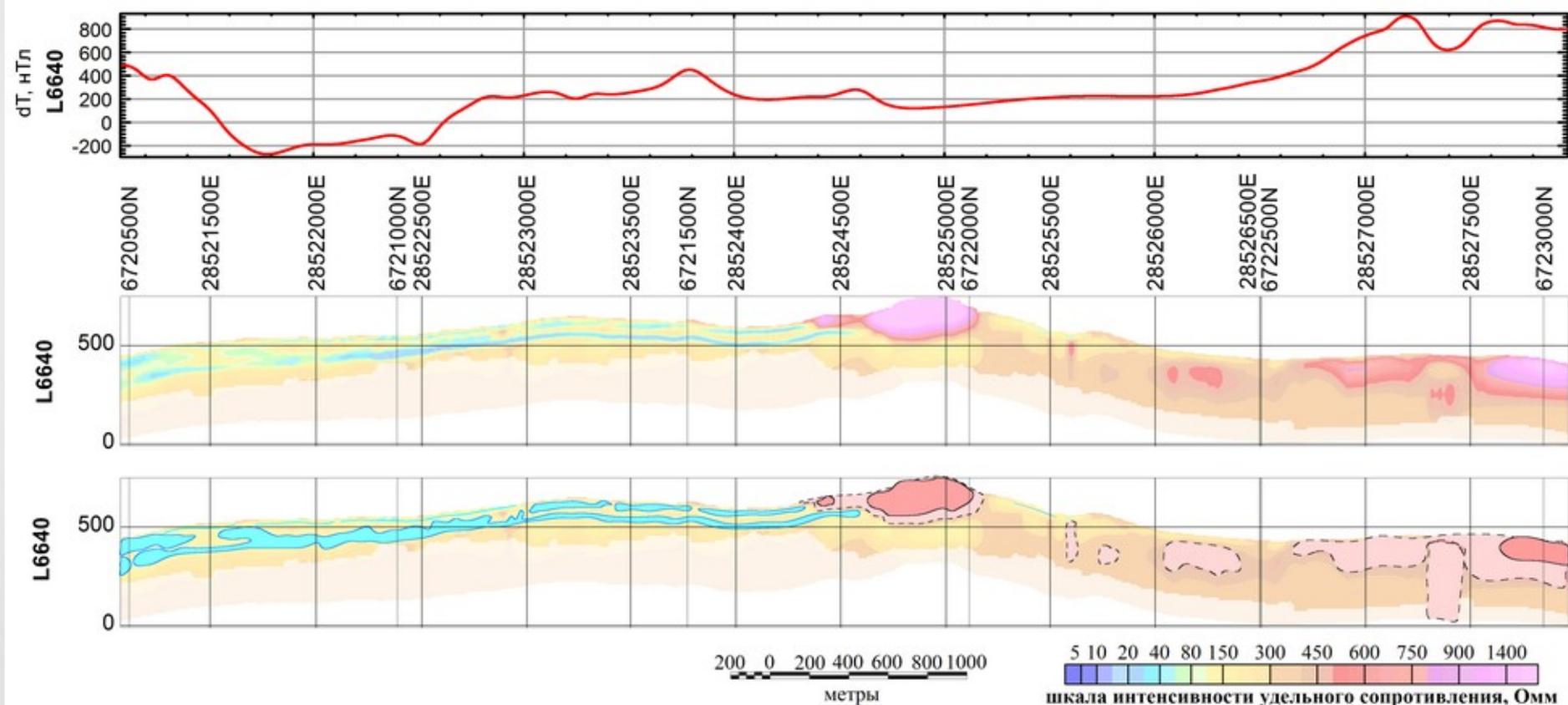
# Поиск гидротермальных золоторудных месторождений. Камчатка. 2021 г.

Схема результатов интерпретации геофизических полей по участку Чеинз



# Поиск гидротермальных золоторудных месторождений. Камчатка. 2021 г.

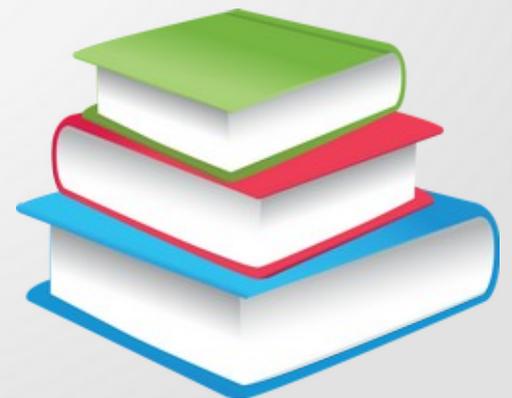
Геолого-геофизический разрез по профилю 6640 по участку Чеинг



Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением  
с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных



**Спасибо за внимание!**



## Навигация пешехода с использованием БИНС, закрепленных на стопах

Брагин А.В. аспирант МГУ имени М.В. Ломоносова, инженер лаб. №1 ИПУ РАН

Научный руководитель – профессор Болотин Ю.В.

Москва-2022



## Первые работы по пешеходной навигации с применением инерциальных датчиков:

### References

1. T. Judd, "A Personal Dead Reckoning Module," *Proc. Inst. of Navigation Global Positioning System Conf.*, ION, 1997.
2. C. Randell, C. Djalllis, and H. Muller, "Personal Position Measurement Using Dead Reckoning," *Proc. 7th IEEE Int'l Symp. Wearable Computers*, (ISWC), IEEE CS Press, 2003, pp. 166-173.
3. M. Kourogi and T. Kurata, "Personal Positioning Based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera," *Proc. 2nd IEEE and ACM Int'l Symp. Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2003, pp. 103-112.
4. L. Sher, "Personal Inertial Navigation System (PINS)," DARPA, 1996;  
<http://www.darpa.mil/MTO/SmartMod/Factsheets/Pins.html>.
5. J. Elwell, "Inertial Navigation for the Urban Warrior," *Proc. SPIE*, vol. 3709, SPIE: The Int'l Soc. for Optical Eng., 1999, pp. 196-204.
6. R. Stirling et al., "An Innovative Shoe-Mounted Pedestrian Navigation System," *Proc. European Navigation Conf. (GNSS)*, CD-ROM, Austrian Inst. of Navigation, 2003.

В работе [5] (1999) были предложены подходы к решению задачи, которые в ходу до сих пор:

- Использование МЭМС
- Крепление к стопе (в каблук)
- Коррекция по нулевой скорости (ZUPT)
- Коррекция по нулевой угловой скорости (ZARU)

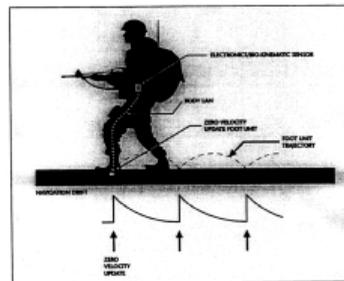


Figure 1. Human Walking Dynamics.

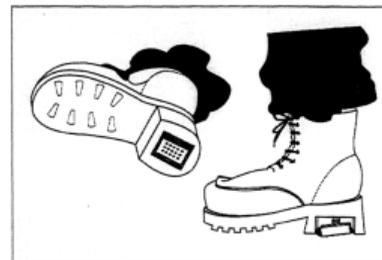
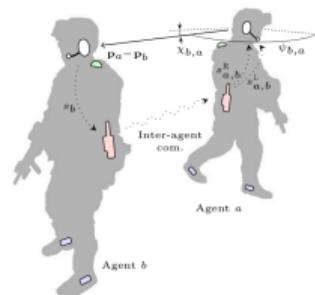
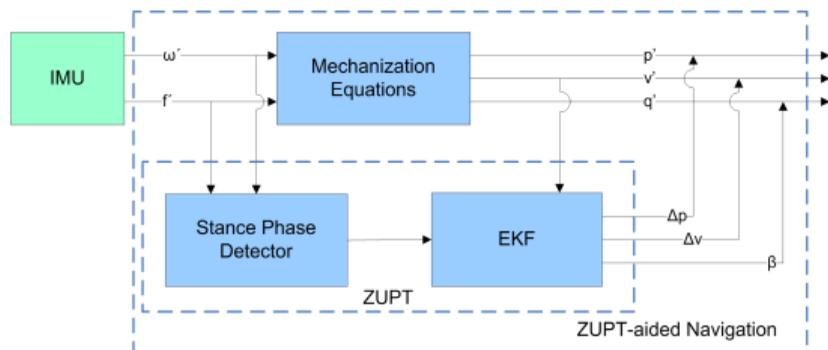


Figure 2. Integrated Configuration ZUPT/ZARU Foot Unit.

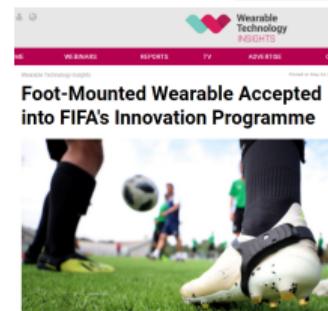


Принципиальная схема обработки информации:



Направления развития:

- Повышение надежности детектора нулевой скорости
- Добавление новых способов коррекции
- Использование методов машинного обучения



Основные способы коррекции навигационного решения:

- Коррекция по нулевой скорости
- Коррекция по расстоянию между стопами
- Коррекция по информации о прямолинейности движения

Основное достижение – предложена модификация, позволяющая получить состоятельный расширенный фильтр Калмана для первых двух типов коррекции

$$O_k = \begin{bmatrix} H_k \\ H_{k+1}F_{k+1,k} \\ H_{k+2}F_{k+2,k} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad N_k = \text{Ker}O_k$$

- Y. Bolotin, A. Bragin, and I. Gartsev. "Covariance Error Analysis for Pedestrian Dead Reckoning with Foot Mounted IMU" IPIN2019
- Y. Bolotin, A. Bragin, and D. Gulevskiy. "On consistency of EKF for pedestrian dead reckoning with foot mounted IMU" ICINS, IEEE, 2020

Наш подход:

### Определение

ЕКФ структурно состоятелен, если размерности  $N_k$  ЕКФ и идеального ЕКФ равны

Идеальный ЕКФ – ЕКФ, использующий линейризацию в окрестности истинной траектории

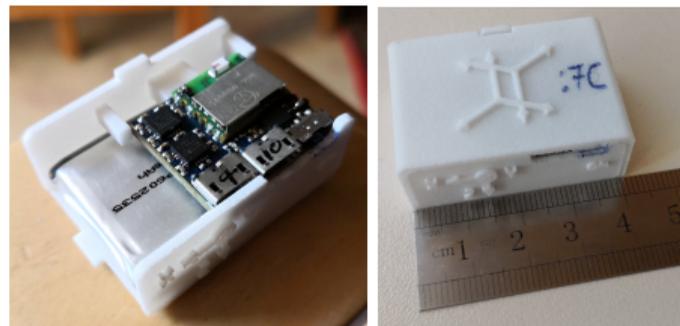


Эксперименты проводятся в здании ВМК и на улице



- Замкнутые траектории
- Длительность 1,3,5,10 минут
- Тип движения – ходьба

Датчики MPU9250. Запись на телефон по Bluetooth, работа от батареек 500 mAh



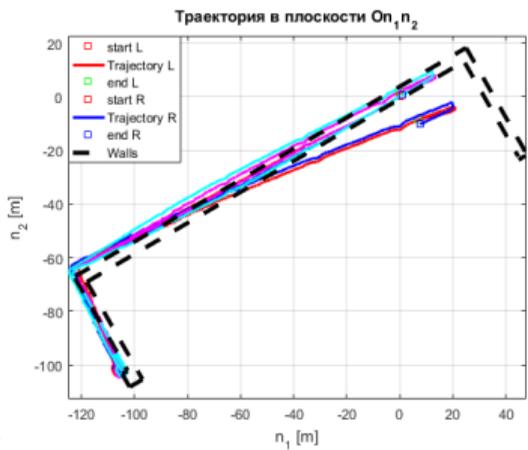
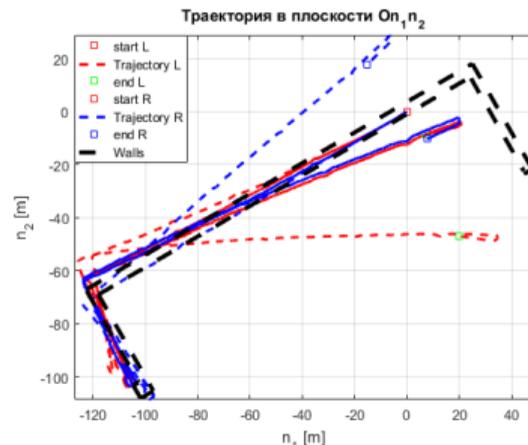
- СКО шума  $\approx 0.1 \text{ deg/s}$
- Стабильность нуля –  $8 \text{ deg/h}$  ( $\tau \approx 10 \text{ s}$ )
- Стабильность от запуска к запуску –  $5-10 \text{ deg/h}$
- Частота записи 125 Гц



- 1 Изучение специфического варианта ЕКФ, предполагающего работу с уравнениями ошибок БИНС в группах Ли.

- A. Barrau and S. Bonnabel, "The invariant extended Kalman filter as a stable observer" , 2017
- A. Barrau and S. Bonnabel, "Linear observed systems on groups" , 2019

- 2 Проверка собственного алгоритма, использующего информацию и о расстоянии между стопами, и о прямолинейности движения



# Решение задач идентификации и управления на основе дифференциальных нейросетей (для динамических систем с неизвестной правой частью)

Андрианова О.Г.

к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории № 1 ИПУ РАН

12 мая 2022 г.



# Постановка задачи идентификации на основе ДНС

Нелинейная система с неизвестной правой частью задана в виде

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t), u(t)). \quad (1)$$

Приближенное представление системы

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + W_1^* \phi_1(x(t)) + W_2^* \phi_2(x(t))u(t) + \tilde{f}(x(t), u(t)). \quad (2)$$

Идентификатор на основе ДНС

$$\frac{d}{dt}\hat{x}(t) = A\hat{x}(t) + W_1(t)\phi_1(\hat{x}(t)) + W_2(t)\phi_2(\hat{x}(t))u(t). \quad (3)$$

Требуется найти  $W_1(t)$ ,  $W_2(t)$  такие, чтобы  $\hat{x}(t)$  с течением времени “приближалось” к  $x(t)$ .

Законы изменения весов вида

$$\frac{d}{dt}W_i(t) = \Xi_i(\hat{x}(t), x(t), t)$$

будут получены с использованием теории устойчивости Ляпунова

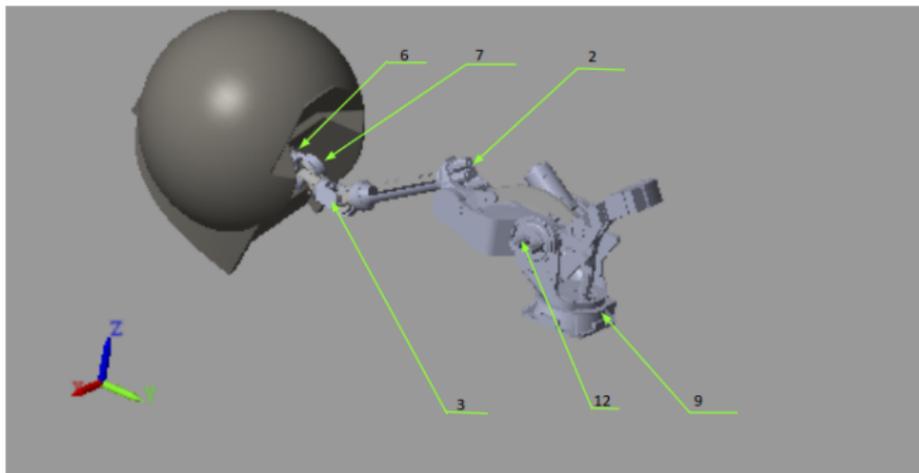


# Работы, опубликованные в 2022 [Chairez et al., 2022a, Chairez et al., 2022b]

-  Chairez, I., Andrianova, O., Poznyak, T., and Poznyak, A. (2022a). Adaptive modeling of nonnegative environmental systems based on projectional differential neural networks observer. *Neural Networks*, 151:156–167.
-  Chairez, I., Mukhamedov, A., Prud, V., Andrianova, O., and Chertopolokhov, V. (2022b). Differential neural network-based nonparametric identification of eye response to enforced head motion. *Mathematics*, 10(6).



# Объект исследования: модель многозвенной роботизированной руки 'Fanuc M-2000iA/900L'



- Идентификация динамической модели
- Учет динамических ограничений на движения
- Построение законов управления в задаче следования вдоль заданной траектории



- 1 Indirect Acceleration Tracking of Robotic Arm by Power Regulation of Actuator Using Averaged Subgradient Control // 11th Symposium on Control of Power and Energy Systems
- 2 Trajectory Tracking of Robotic Arm Based on Power Regulation of Actuator Using Neural Averaged Subgradient Control // 11th Symposium on Control of Power and Energy Systems
- 3 Adaptive Control of Robotic Arm-Based Motion Cueing System Considering Phase Restrictions // XVI International Conference “Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems” (Pyatnitskiy’s Conference)



- 1 Задача идентификации с учетом нестационарных ограничений на переменные состояния
  - Задел: подготовленная статья “Differential Neural Network Identifier for Dynamical Systems with Time-Varying State Constraints” совместно с И. Чаирезом, А. Позняком, И. Начевским и Э. Слепцовым
- 2 Задача идентификации с использованием регуляризации Тихонова (с учетом нестационарных ограничений)
- 3 Задача следования вдоль заданной траектории (в продолжение пункта 2)
- 4 Идентификация динамической системы космического аппарата на основе данных телеметрии (совместно с м.н.с. лаб. № 27 А.А. Тутуровым)



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



# КАЛИБРОВКА БЛОКА МАГНИТОМЕТРОВ С ПРИВЯЗКОЙ К ОСЯМ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Павел Кузнецов

ИПУ РАН

Лаборатория 01

# Введение: постановка исследуемой задачи

---

Имеется инерциальный блок, в составе которого трехосный акселерометр, трехосный гироскоп и трехосный магнитометр.

## ▶ Задачи:

1. Откалибровать трехосный магнитометр ;
2. Совместить чувствительные оси магнитометра с осями акселерометров;
3. Процесс должен происходить в течение одной итерации;
4. Инерциальный блок считается откалиброванным.

## ▶ Решение:

1. Произвести калибровку путем наблюдения скалярного произведения вектора реакции опоры (измерения акселерометров) и вектора магнитной индукции (измерения магнитометров).

# Введение: нелинейная модель измерений магнитометра

---

Справедлива следующая **нелинейная** калибровочная модель:

$$H_z^{IGRF} + H_z^{ANOM} = H_z = A_H(E + S_H)(H' + \Delta H) + \delta_H. \quad (1)$$

Где:

- ▶  $S_H$  - матрица мягких искажений (мультипликативные масштабные коэффициенты и перекосы осей чувствительности) и погрешностей самого магнитометра;
- ▶  $\Delta H$  - вектор жестких искажений (аддитивный вектор) и погрешностей самого магнитометра;
- ▶  $A_H$  - матрица поворота осей магнитометра к осям акселерометра, параметризованная 3-мя углами;
- ▶  $\delta_H$  - вектора случайного шума различного рода и др.

## Введение: линейная модель измерений магнитометра

Для упрощения задачи оценивания калибровочных параметров можно перейти к **линейной** системе следующего вида:

$$H_z = (E + S_H)H' + \Delta H + \delta_H. \quad (2)$$

Где:

$$S_H = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix}, \quad \Delta H = \begin{pmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \Delta H_3 \end{pmatrix}, \quad \delta_H = \begin{pmatrix} \delta_{H_1} \\ \delta_{H_2} \\ \delta_{H_3} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Количество оцениваемых параметров что в нелинейной, что в линейной постановке остается неизменным.

# Калибровка: скалярное произведение

---

В качестве измеряемого параметра, обеспечивающего наблюдаемость всех калибровочных коэффициентов, используется скалярное произведение:

$$(n_z, H_z) = \|H_z\| \cos\left(\frac{\pi}{2} + \vartheta\right) \quad (4)$$

- ▶  $n_z = \frac{f_z}{\|f_z\|}$  – вектор нормали в проекции на измерительные оси акселерометров;
- ▶  $\vartheta$  - угол наклона магнитного поля к горизонту, посчитанный по IGRF-13 версии стационарного магнитного поля.

## Калибровка: оценивание

---

Оценка калибровочных параметров проводится при помощи рекуррентного метода наименьших квадратов (МНК). Рассматривается два варианта оценивания:

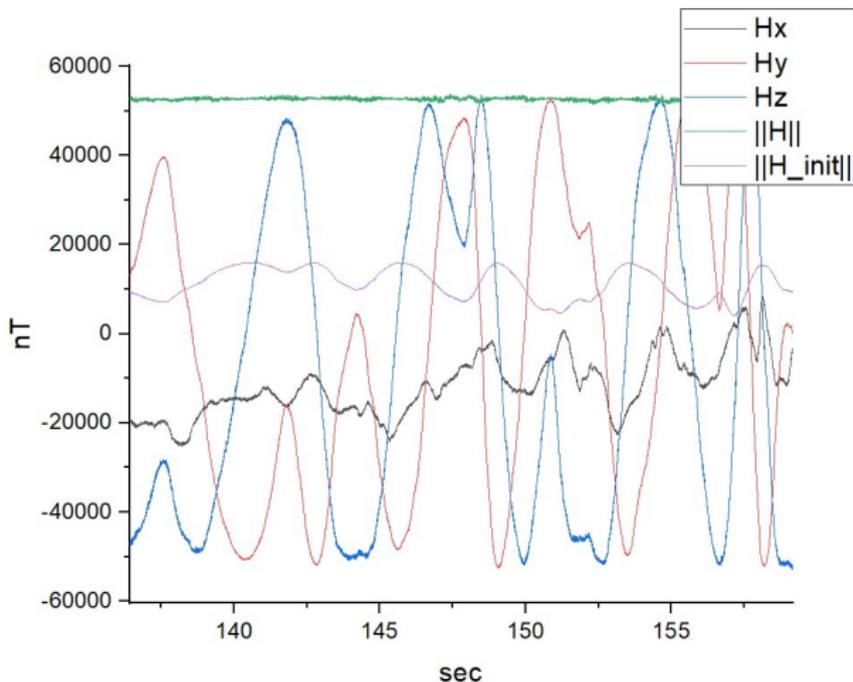
1. Вектор состояния включает в себя только калибровочные параметры линейной модели измерений магнитометра:

$$x = \left( s_{ij} \quad \Delta H_i \right). \quad (5)$$

2. Вектор состояния включает в себя калибровочные параметры линейной модели измерений магнитометра и ошибку угла наклона  $\Delta\vartheta$ :

$$x = \left( s_{ij} \quad \Delta H_i \quad \Delta\vartheta \right). \quad (6)$$

# Результаты: первый вариант задачи оценивания



Показания магнитометров в калибровочном эксперименте

# Выводы

---

## Результаты:

1. Показана работоспособность алгоритма калибровки с привязкой к осям акселерометров на имитационных данных. Численно показана наблюдаемость всех оцениваемых параметров.
2. Показана работоспособность на реальных данных.

## План:

1. Ввести в алгоритм оценивания показания гироскопов.
2. Модернизировать алгоритм для оценивания ошибки угла наклона.
3. Разработать алгоритм автономного определения угла курса по показаниям магнитометров.

Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

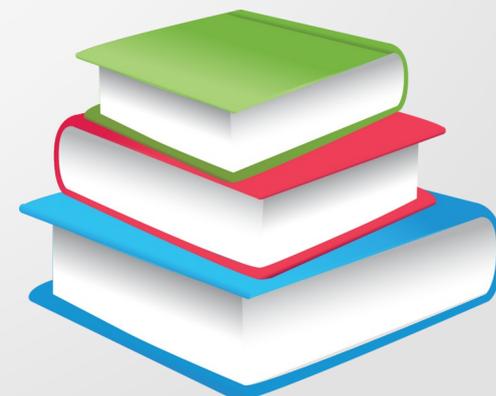
## Школьники



Гаракоев Амир Мусаевич, м.н.с, лаб.  
№1, 1993

Управление процессом измерения  
физических полей на борту летательного  
аппарата

6 докладов –  
соавтор  
1 статья – соавтор



## Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

### Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

Энергетическая система управления:  $\dot{X} = AX + BU$

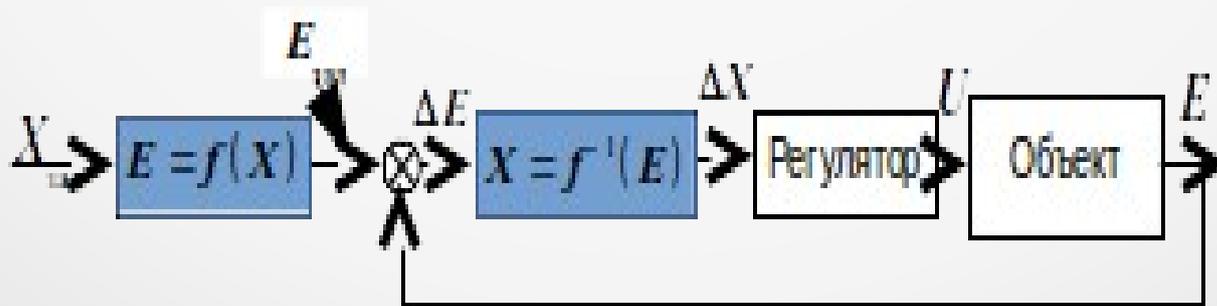
Управляемая величина –  
полная энергия движения:

$$E = mgh + \frac{mV^2}{2}$$

$$U = U(E, \Delta E)$$

Функционал качества:

$$Q_E = Q_E(U, E, \Delta E)$$



Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

## Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

Уравнение баланса энергий в системе объектов: «летательный аппарат – силовая установка – внешняя среда»

$$\Delta H_E = \Delta H_E^{\partial g} + \Delta H_E^D + \Delta H_E^w$$

$$H_E(*) = \frac{E(*)}{mg} = h + \frac{V^2}{2g}$$

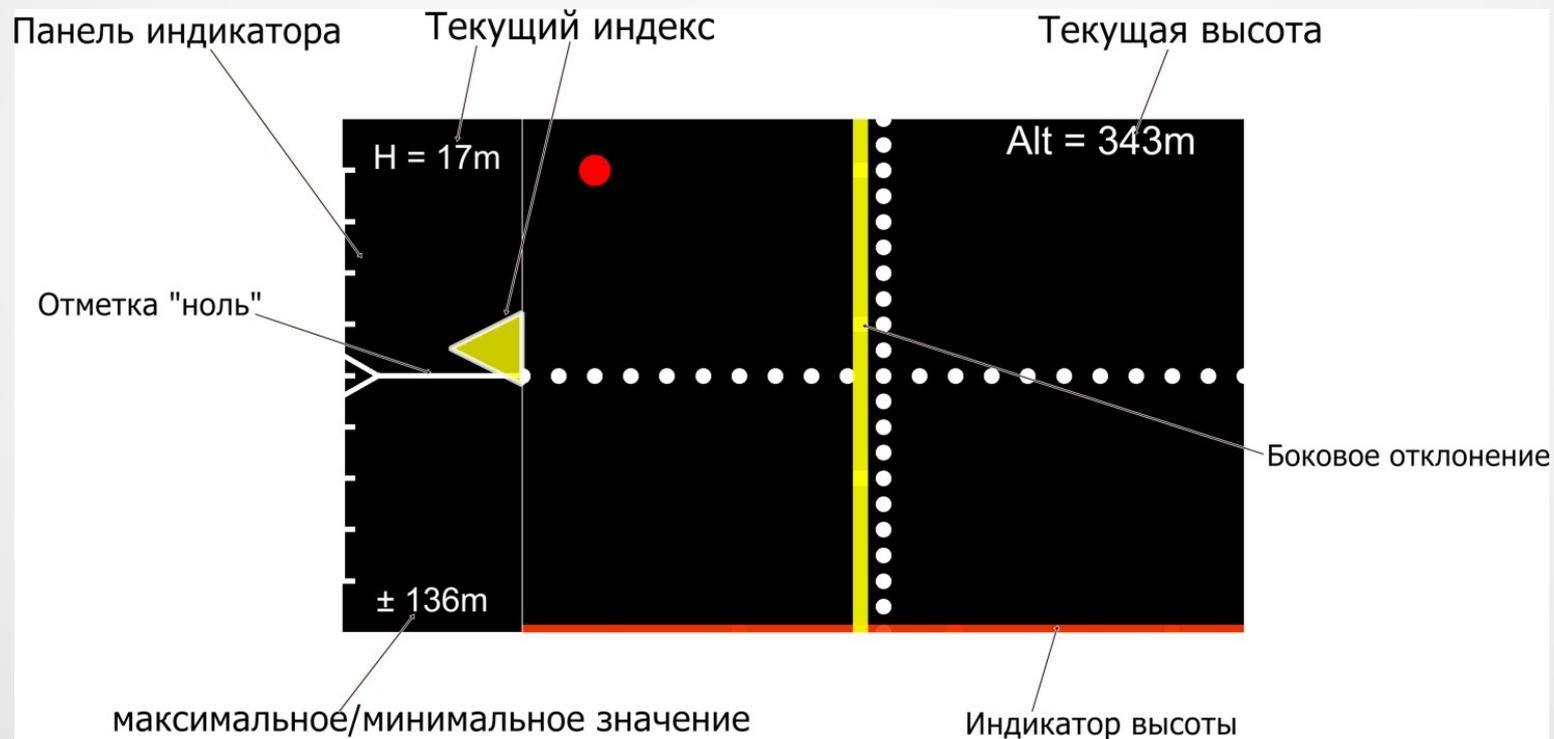
$$\Delta H_E = h - h_{\text{опор}} + \frac{V^2 - V_{\text{опор}}^2}{2g}$$

Цель управления –  $\Delta H_E \Rightarrow 0$

Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

## Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

Вариант дисплея индикатора при ручном режиме пилотирования

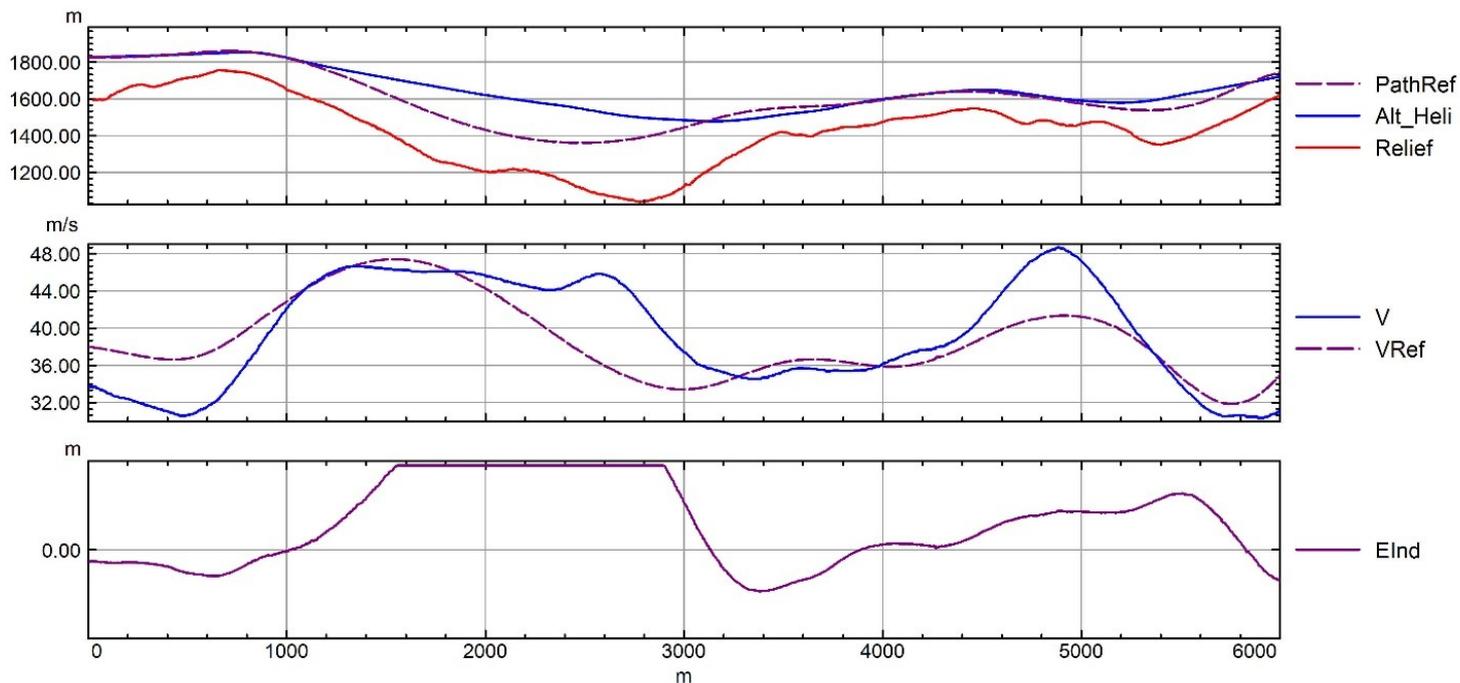


## Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

### Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

1) Для вертолёта:  $E_{ind} = \Delta H_E = H_E - H_{REF}$

$$E_{ind} = Alt_{Heli} - PathRef + \frac{V^2 - VRef^2}{2g}$$

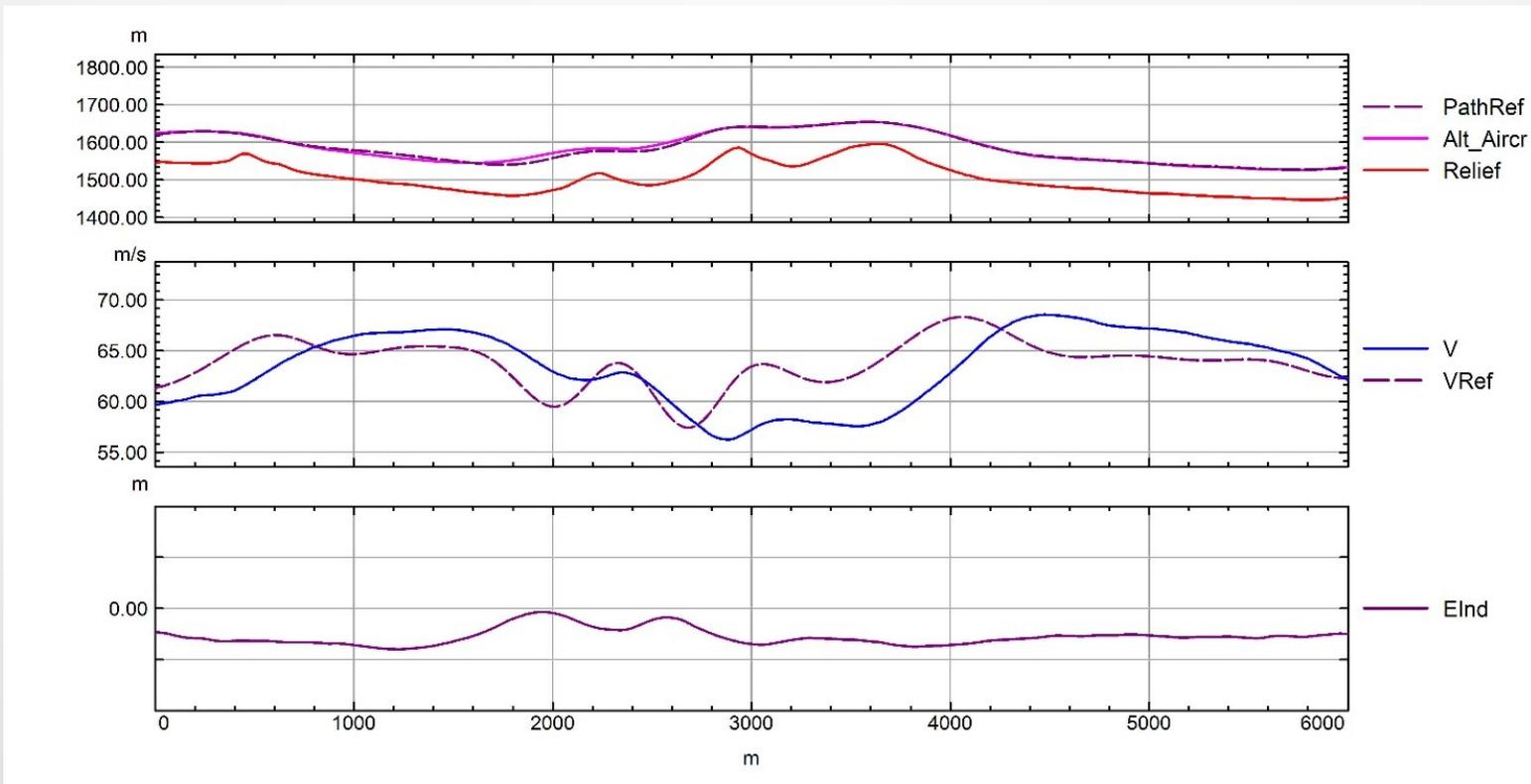


## Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

### Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

1) Для самолёта:  $E_{ind} = \Delta H_E = H_E - H_{REF}$

$$E_{ind} = Alt_{Aircr} - PathRef + \frac{V^2 - VRef^2}{2g}$$

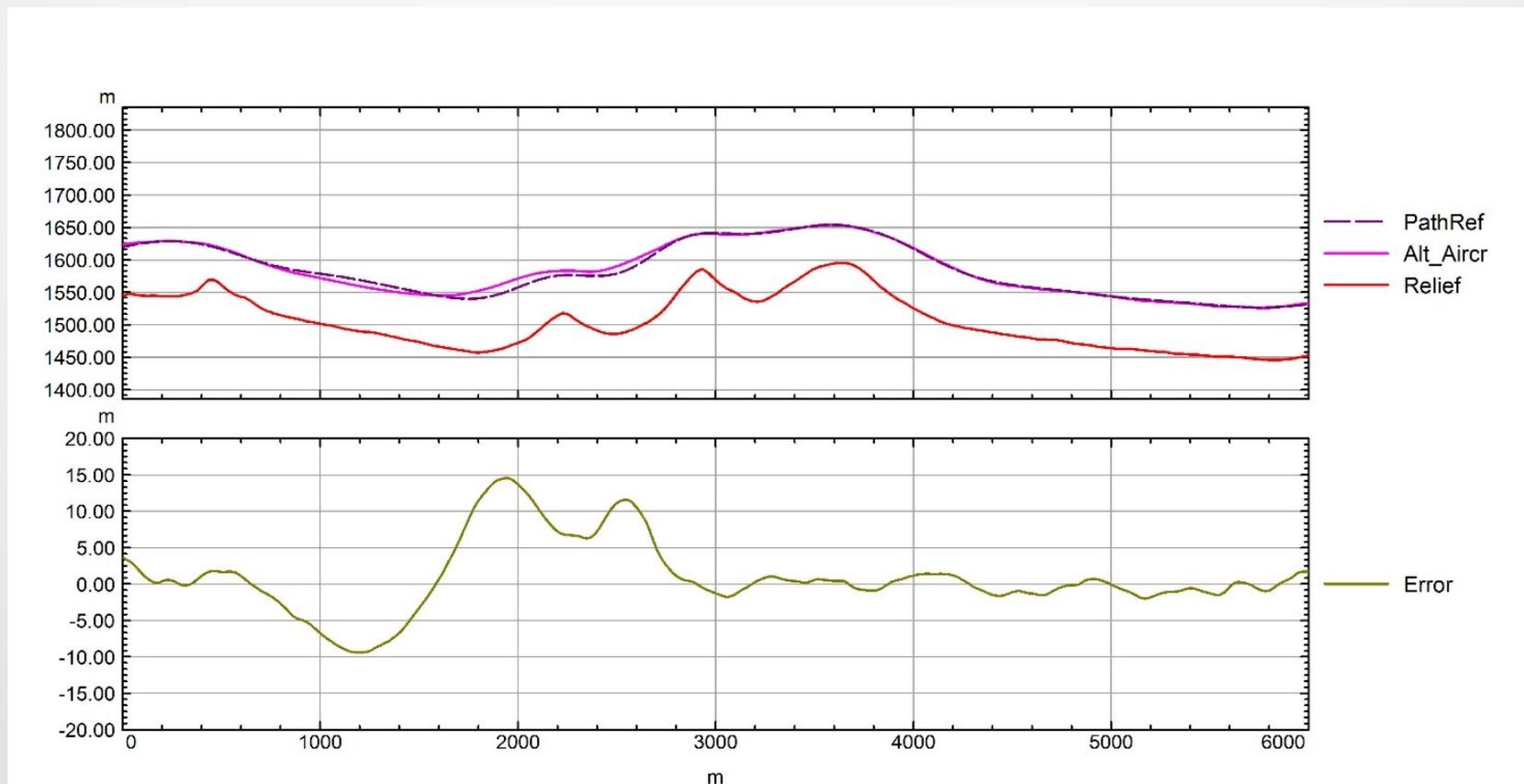


## Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

### Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

Ошибка рассогласования программной и реальной траектории самолёта

Среднее значение ошибки: 0.97 м.

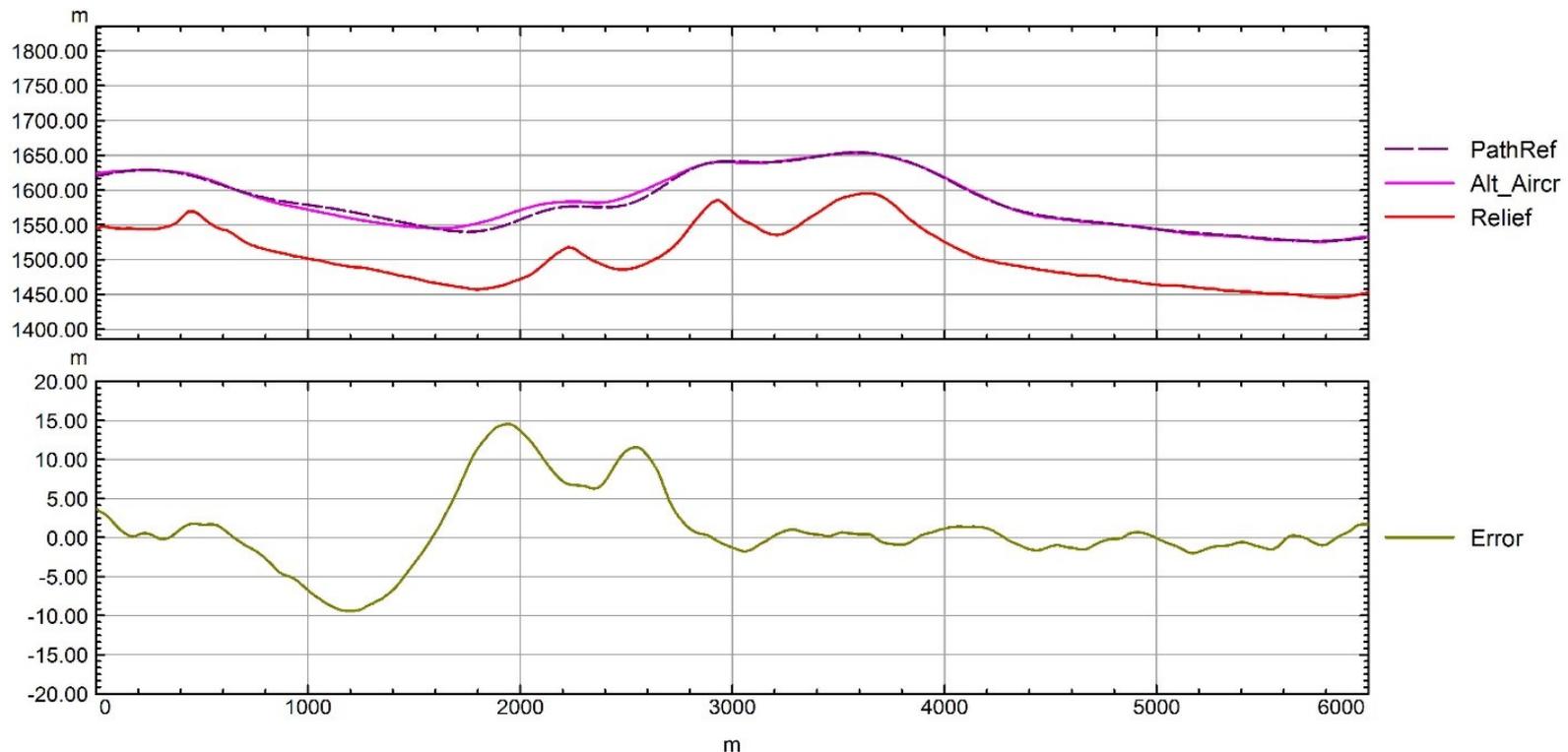


## Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных

### Анализ выполненных полетов по маршрутам покрытия местности выполнения аэрогеофизической съемки

Ошибка рассогласования программной и реальной траектории вертолёта

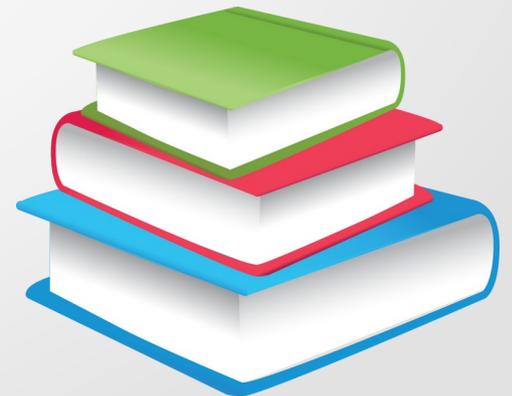
Среднее значение ошибки: 38.82 м.



Задачи управления и оценивания в системах со случайным внешним возмущением  
с приложениями к задачам получения и обработки аэрогеофизических данных



**Спасибо за внимание!**



# Здравствуйте!

Тутуров Алексей Александрович

1994 г.р. г. Владивосток

2011-2017 МАИ, Аэрокосмический факультет,  
каф 601, специалитет

«Проектирование, производство и эксплуатация  
ракет и ракетно-космических комплексов»



# Информационная модель Космического комплекса

## КАДРЫ

НЦОМЗ,  
ЦУП,  
НКПОР,  
СГК

*Телеметрия:*

- Температуры
- показания магнитометров
- показания электромагнитов
- скорости вращения маховиков
- токи
- напряжения
- показания звёздных датчиков
- показания солнечных датчиков
- показания бортовой шкалы времени

*Массив полётного задания  
План сеанса связи  
План задействования средств  
Техническое решение  
План коррекции орбиты  
Функциональные команды*

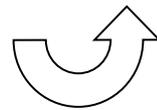
*Информация обратного канала      Флаги  
Радиоконтроль орбиты      Отчёт аппаратуры*

## ПРОГРАММЫ

*Технологический цикл управления  
Программа лётных испытаний  
Программа лётно-конструкторских  
испытаний*

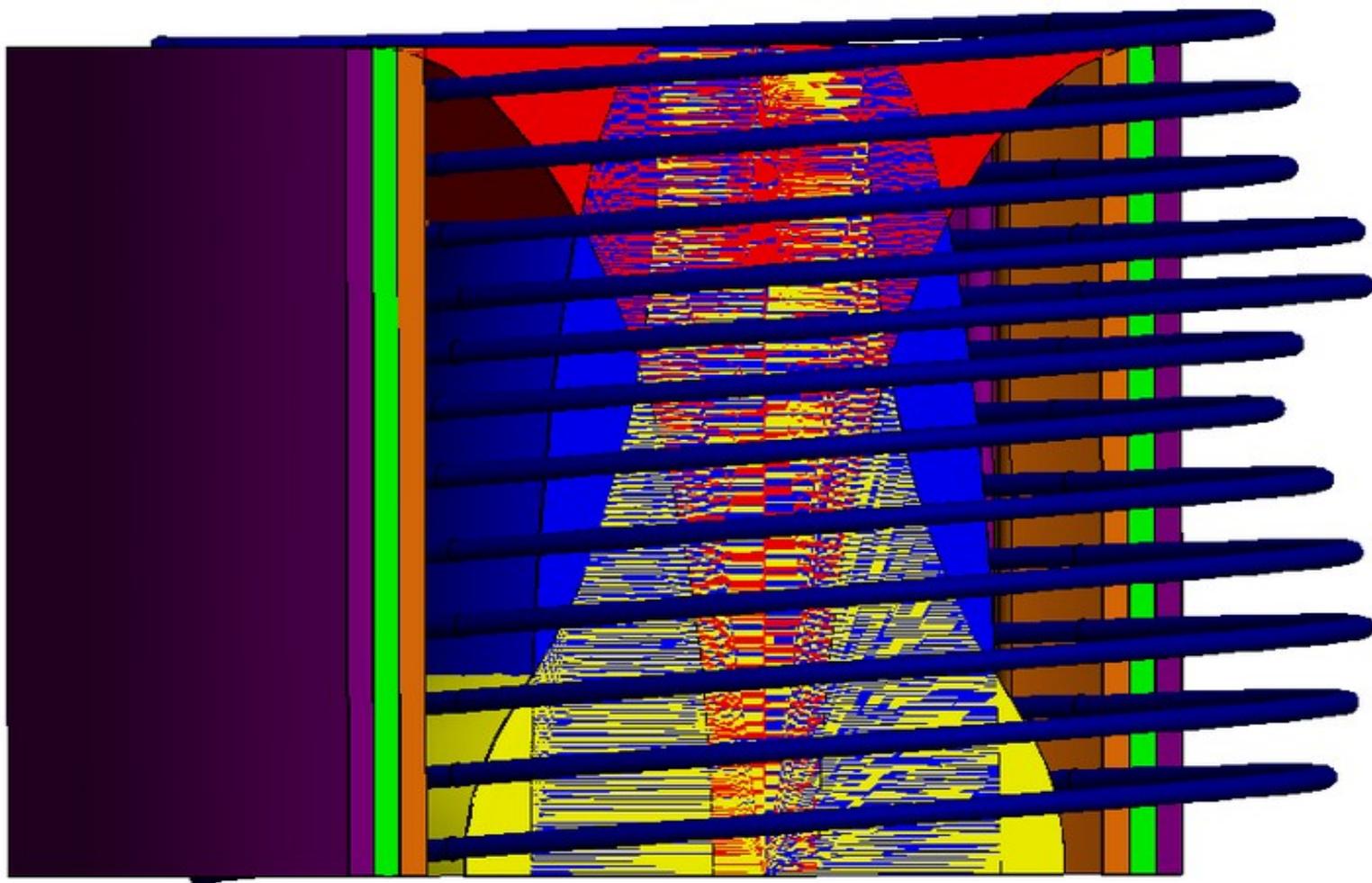
## ТЕХНИКА

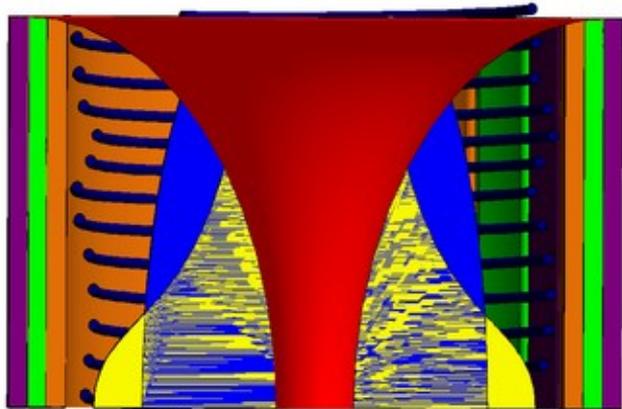
КА, ОГ, РТС, СОТИ, Каналы связи



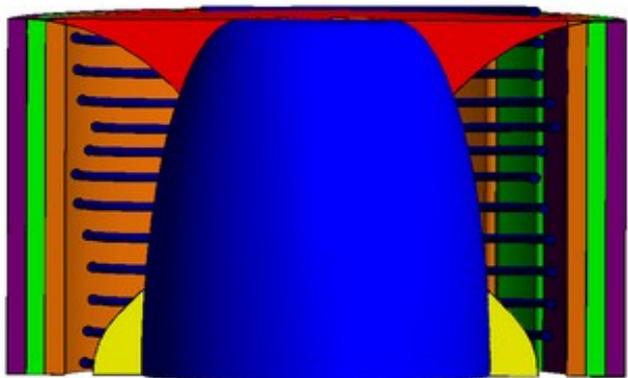
*Счётчики,  
Механизмы,  
Разовые команды,  
Служебные команды,  
Циклограммы,  
Командно-программная информация*

# Графическое представление траектории вектора состояния космического аппарата в рамках космического комплекса как социо-киберфизической системы

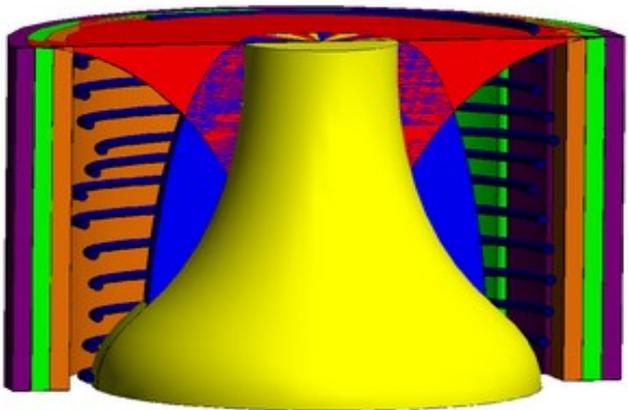




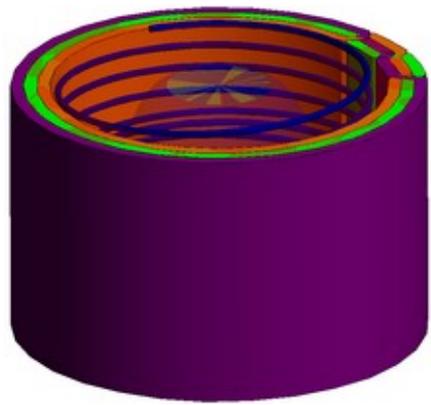
Красным цветом отображена область внутренних ограничений, обусловленных степенью старения техники



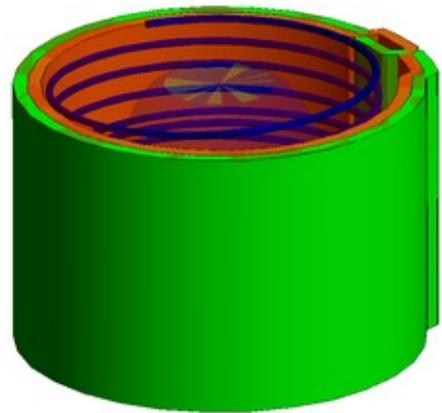
Синим цветом – область внутренних ограничений, обусловленная неполнотой инструкций по эксплуатации



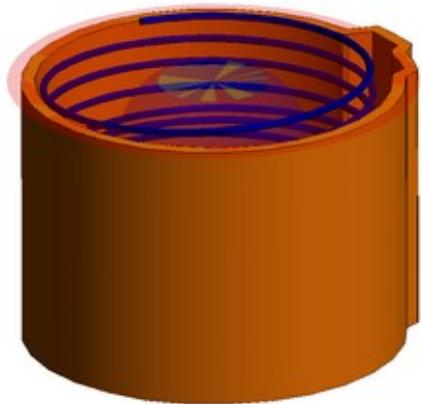
Жёлтым цветом – область внутренних ограничений, обусловленная неполнотой программного обеспечения



Фиолетовым цветом – слой оболочки внешних ограничений, обусловленных кадрово-техническим взаимодействием

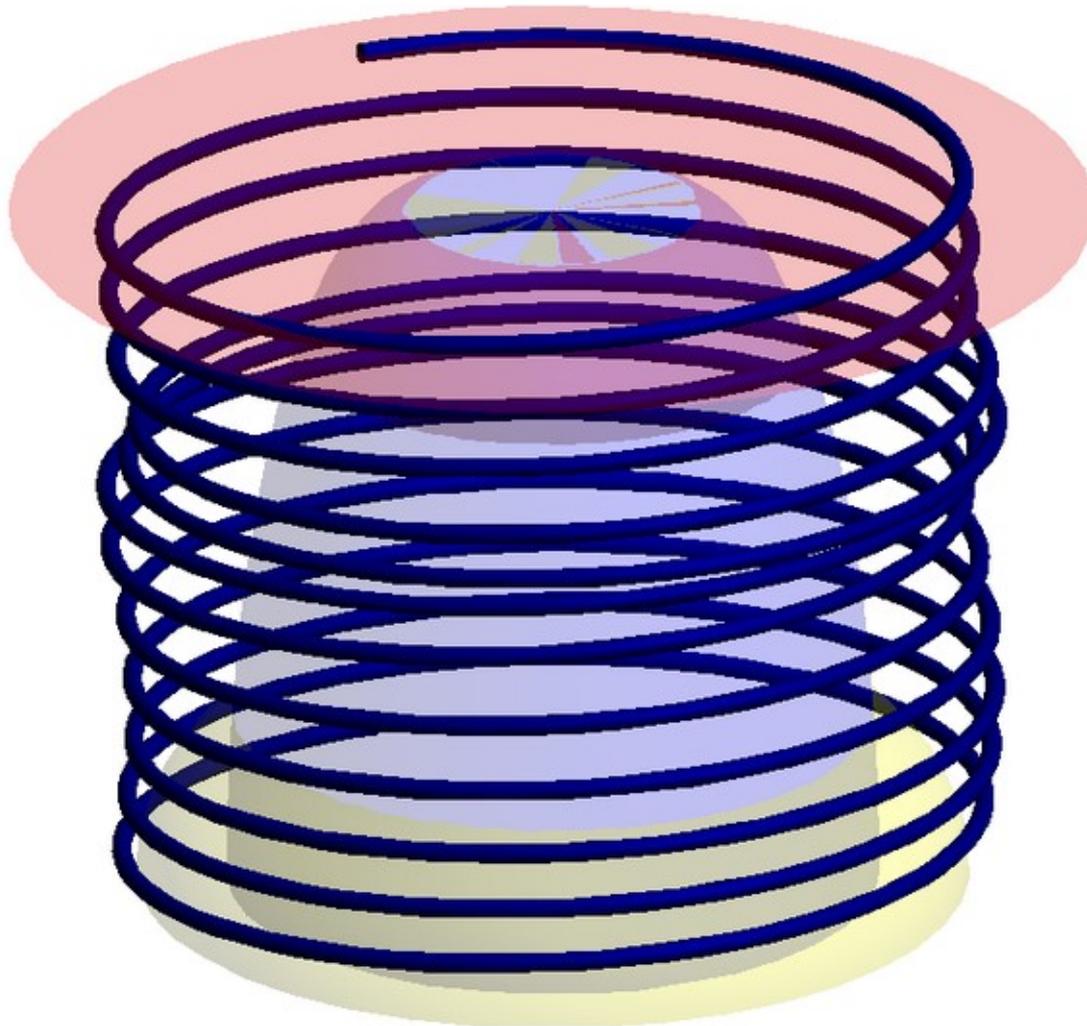


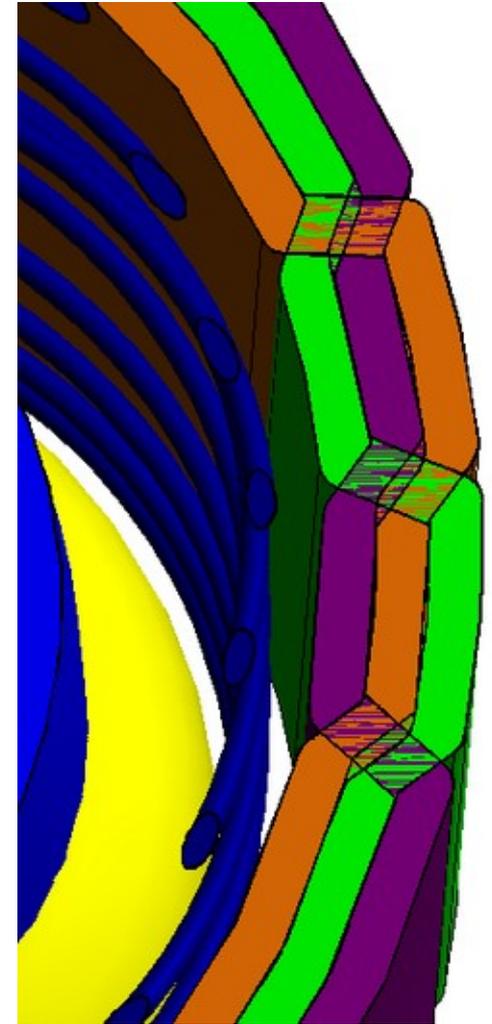
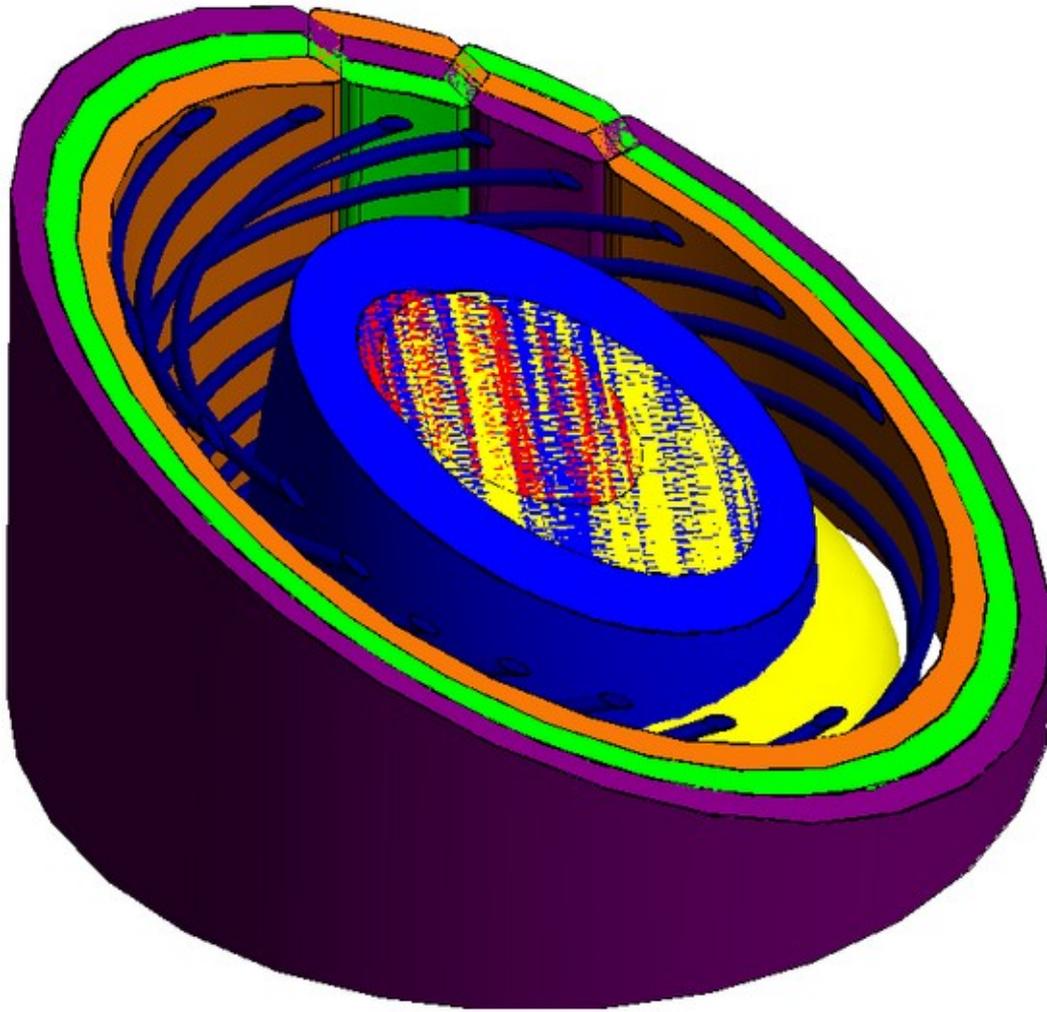
Зелёным цветом – слой оболочки внешних ограничений, обусловленных программно-кадровым взаимодействием



Оранжевым цветом – слой оболочки внешних ограничений, обусловленных технико-программным взаимодействием

Спираль тёмно-синего цвета отображает непосредственно траекторию вектора состояния космического аппарата





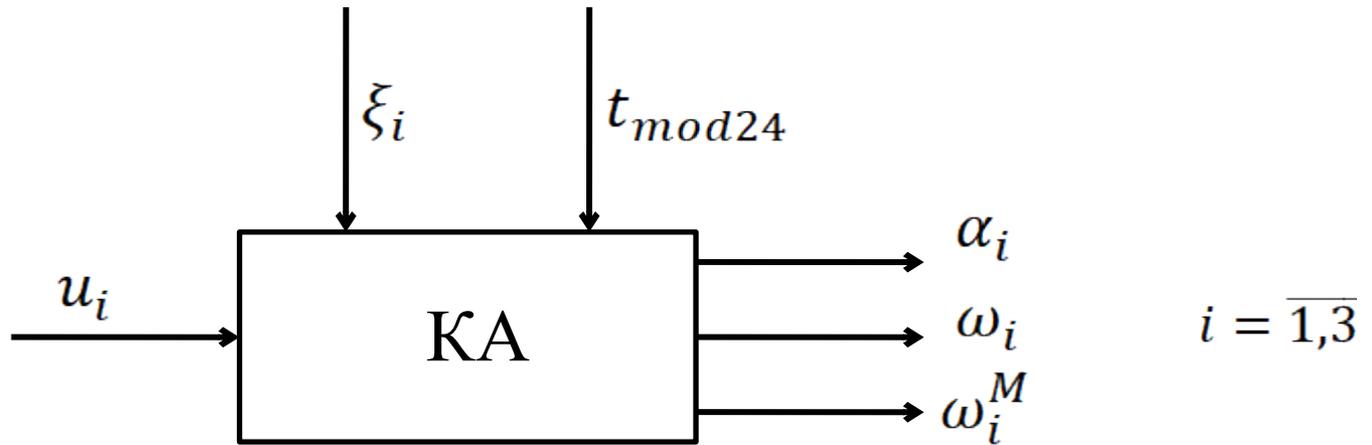
## **План работ:**

### **Алгоритм подготовки данных телеметрии**

1. Разделить поток данных телеметрии КА по системам => элементам => датчикам
2. На уровне элементов выявить набор базовых циклических операций используя уровень систем как граничные условия
3. На уровне датчиков для каждого слоями сформировать корреляционную картину по каждой циклической операции, собирая все массивы данных по конкретной операции в хронологическом порядке
4. На корреляционной картине интерполировать полученную область статистической выборки, задавая уточнённые граничные условия «нормы» для конкретной операции конкретного элемента
5. Собрать все потоки данных по датчикам => элементам => системам, получая хронологический «вектор состояния» всего КА на базе телеметрии

**Подготовленные данные могут быть описаны некоторой динамической системой, идентифицировать динамику этой системы с помощью дифференциальных нейросетей.**

**Посредством анализа вектора состояния КА с помощью фильтров определить множество нештатных ситуаций для решения задачи их прогнозирования**



$$\frac{d\alpha_i}{dt} = f_i(\dots) + u_i + \xi_i$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = g_i(\dots) + u_i + \xi_i$$

$$\frac{d\omega_i^M}{dt} = h_i(\dots)$$

где:

$$u_i = u_i(\omega_i^M, t)$$

$$\|\xi_i\| \leq \xi^+$$

Спасибо за внимание!