



ИНСТИТУТ  
ПРОБЛЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ  
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА  
РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК

# Теория и практика бортовых измерений физических полей в задачах навигации и геофизики

Е.В. Каршаков



# Теория и практика бортовых измерений физических полей в задачах навигации и геофизики

## Содержание

1. Введение
2. Теория
  - модель бортовых измерений
  - обработка измерений
3. Практика
  - геофизика
  - навигация
4. Заключение



# 1. Введение

## Лаборатория № 1 динамических информационно-управляющих систем имени Б.Н. Петрова

академик  
Б.Н. Петров



основатель,  
зав.лаб.  
1952-1980 гг.

д.т.н.  
В.Ю. Рутковский  
лаб. № 8



д.т.н.  
А.П. Курдюков  
зав.лаб.  
2007-2018 гг.



д.т.н.  
М.М. Чайковский  
лаб. № 1

д.т.н.  
Б.В. Павлов  
зав.лаб.  
1983-2007 гг.



д.т.н.  
Е.В. Каршаков  
зав.лаб.  
2018-н.в.



# 1. Введение

## Бортовые измерения физических полей

Измерения на борту подвижного объекта:

- атмосферный летательный аппарат
- надводное или подводное судно
- мобильный объект на поверхности Земли
- космический аппарат



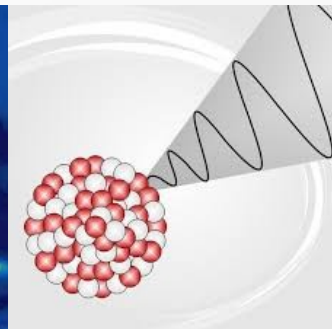
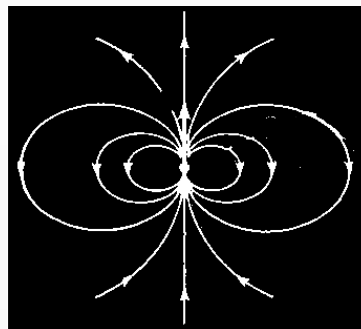
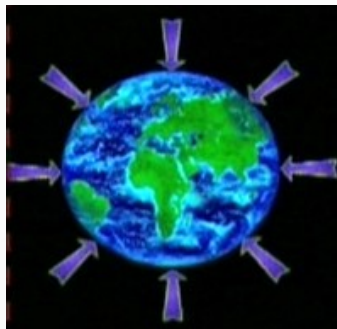
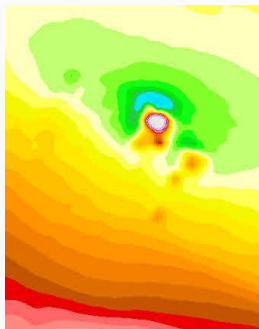
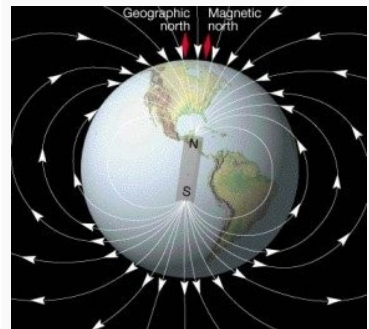


# 1. Введение

## Рассматриваемые физические поля

Измерения на борту подвижного объекта:

- стационарное магнитное поле
- переменное магнитное поле
- гравитационное поле
- инфракрасное излучение
- гамма-излучение



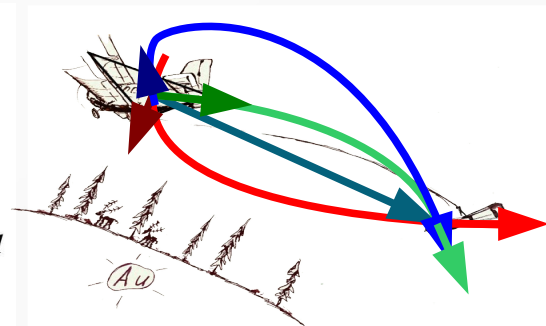
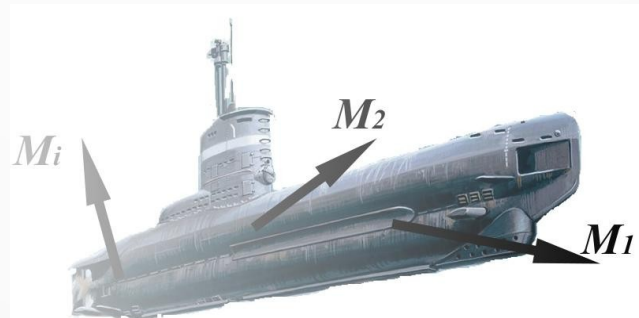
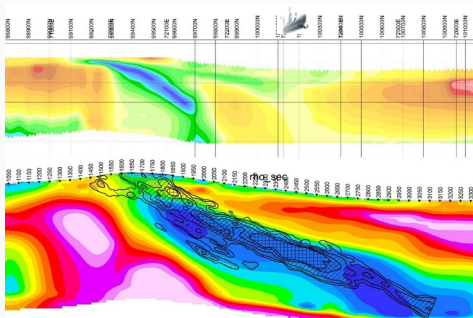
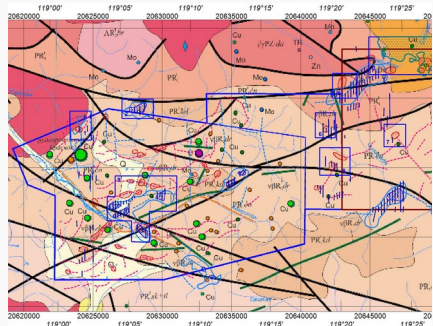


# 1. Введение

## Решаемые задачи

### Геофизика и навигация:

- геологическое и геофизическое картирование
- поиск, оценка и исследование месторождений ПИ
- определение характеристик поля подвижного объекта
- определение координат подвижного объекта
- определение взаимного положения и ориентации объектов





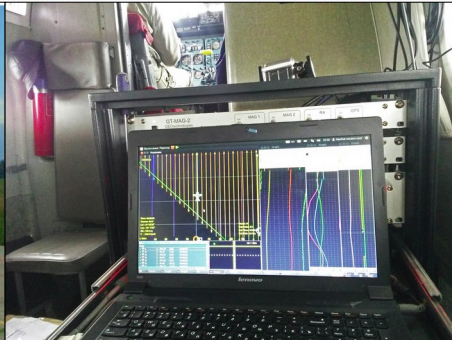
## 2. Теория Модель бортовых измерений

### для потенциальных полей

Вовенко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. The models and structure of onboard measurements of three-dimensional physical fields // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78, № 6. С. 1115-1127.

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы. Монография в двух томах. М.: ИПУ РАН, 2018. – 149 с., 135 с.

Волковицкий А.К., Гольдин Д.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Принципы построения, структуры и алгоритмы аэроэлектроразведочных комплексов: монография в двух частях. 1-е изд. М.: ИПУ РАН, 2013. – 142 с., 114 с.





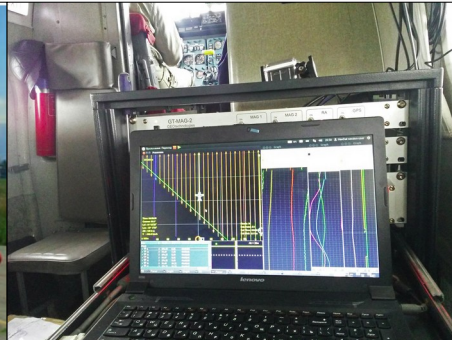
## 2. Теория Модель бортовых измерений

### Измеряемые параметры: магнитометрия



модуль индукции  
вектор индукции  
вектор градиента модуля индукции  
тензор градиента индукции

$$B = |\nabla U^B|$$
$$\mathbf{B} = \nabla U^B$$
$$\nabla B = \nabla |\nabla U^B|$$
$$\nabla \mathbf{B}^T = \nabla \nabla^T U^B$$







## 2. Теория Модель бортовых измерений

Измеряемые параметры: электромагнитные измерения

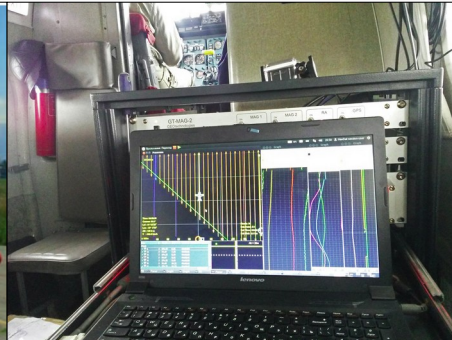
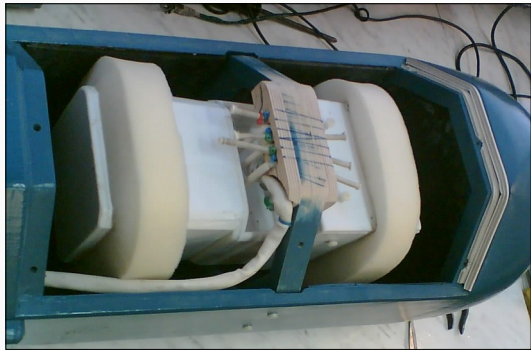
вектор поля в частотной области

$$\mathbf{H}(\omega) = \nabla U^H(\omega)$$

вектор поля во временной области

$$\mathbf{H}(t) = \nabla U^H(t)$$

$$\mu \mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{B}$$





## 2. Теория Модель бортовых измерений

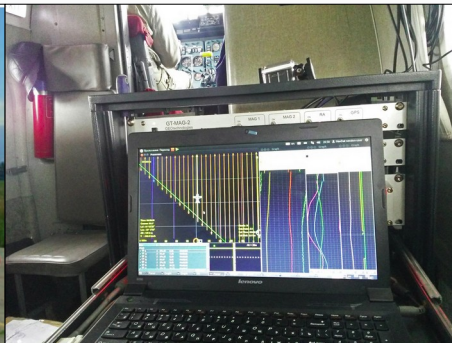
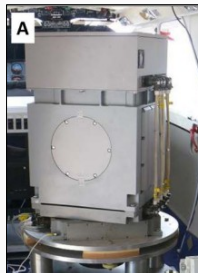
Измеряемые параметры: гравиметрия

вертикальная компонента вектора  
удельной силы тяжести  
вектор удельной силы тяжести  
тензор градиента  
удельной силы тяжести

$$g_3 = \nabla_3 U^g$$

$$\mathbf{g} = \nabla U^g$$

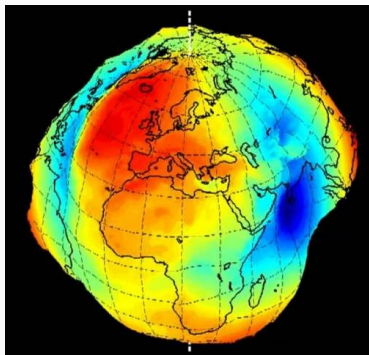
$$\nabla \mathbf{g}^T = \nabla \nabla^T U^g$$





## 2. Теория Модель бортовых измерений

### Измеряемые параметры



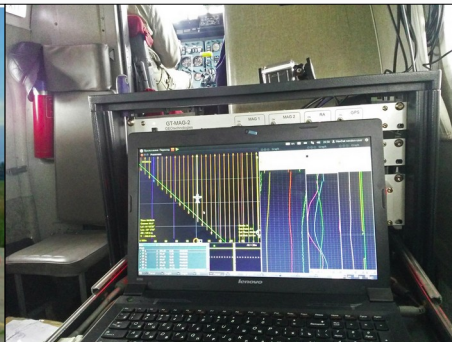
$$U_{\text{изм}} = U_n + U_a + U_v + U_c,$$

$U_n$  — потенциал нормальной составляющей поля

$U_a$  — потенциал аномальной составляющей

$U_v$  — потенциал вариационной составляющей поля

$U_c$  — потенциал наведенного со стороны носителя поля



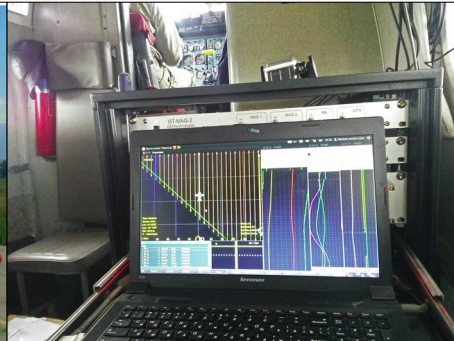


## 2. Теория Модель бортовых измерений

$$f_{\text{изм}} = f_n + f_a + f_v + f_c + \Delta f,$$

$$f_* = f_* (\nabla^i U)$$

$f_{\text{изм}}$	$f_n$	$f_a/f_n$	$f_v/f_n$	$f_c/f_n$	$\Delta f/f_n$
$B, [\text{нТл}]$	$10^4$	$10^{-5}-10^{-1}$	$10^{-3}$	$10^{-2}-10^{-1}$	$10^{-5}$
$\nabla B, [\text{нТл/м}]$	$10^{-2}$	$10^0-10^2$	$10^{-1}$	$10^3$	$10^0$
$g_3, [\text{мГал}]$	$10^6$	$10^{-7}-10^{-4}$	$10^{-7}$	$10^{-1}$	$10^{-7}$
$\nabla \mathbf{g}^T, [\text{Э}]$	$10^3$	$10^{-2}-10^{-1}$	$10^{-5}$	$10^2$	$10^{-2}$
$\mathbf{H}, [\text{А/м}]$	$10^0$	$10^{-7}-10^{-3}$	$10^{-7}$	$10^{-3}$	$10^{-7}-10^{-6}$

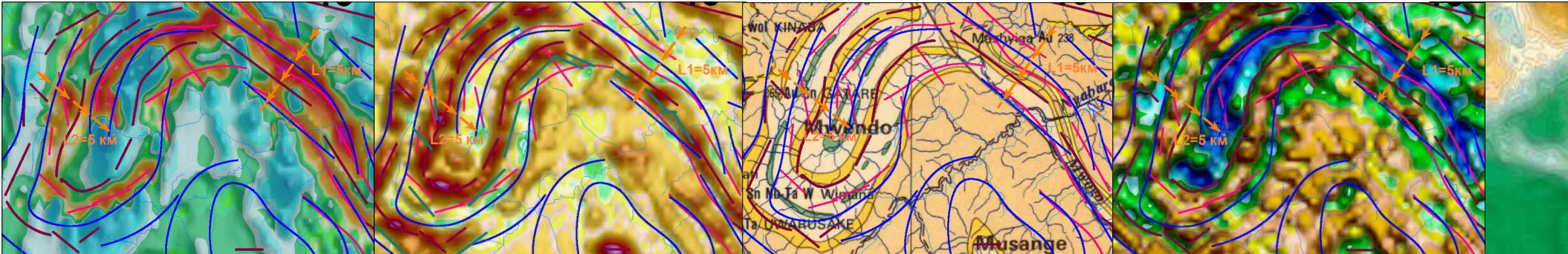




## 2. Теория Обработка измерений

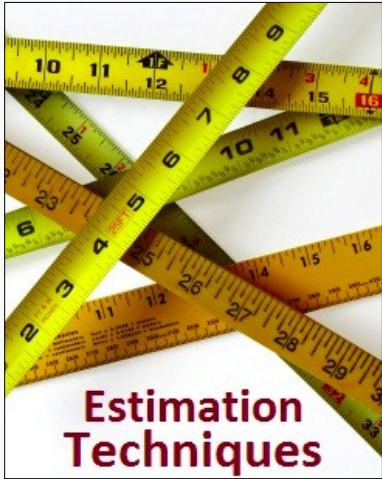
### Задачи

- 1) Идентификация параметров модели наведенного поля
- 2) Фильтрация данных для исключения влияния помех
- 3) Идентификация параметров аномального поля
- 4) Выделение вариационной составляющей поля
- 5) Выделение аномальной составляющей поля
- 6) Интерпретация аномальной составляющей поля





## 2. Теория Обработка измерений



### Математическая постановка задачи

Уравнения измерений

$$\mathbf{Z}_{(j)} = \mathbf{H}_{(j)}(\mathbf{X}_{(j)}, \mathbf{r}_{(j)}).$$

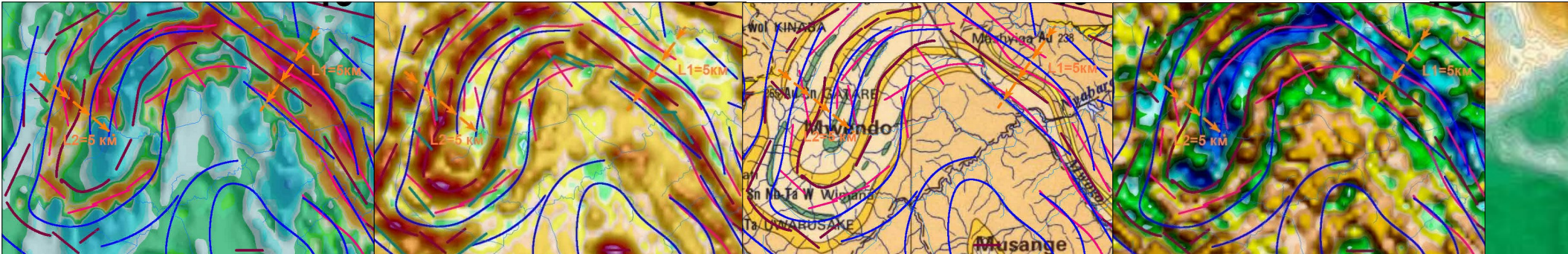
Уравнения динамики

$$\mathbf{X}_{(j+1)} = \mathbf{F}_{(j)}(\mathbf{X}_{(j)}, \mathbf{q}_{(j)}).$$

Задача

$$\tilde{\mathbf{X}}_{(j)}: \|\mathbf{X}_{(j)} - \tilde{\mathbf{X}}_{(j)}\| \rightarrow \min, \\ j=0, \dots, N$$

$\mathbf{Z}$  — вектор измерений,  $\mathbf{X}$  — вектор параметров модели,  
 $\mathbf{r}$  — вектор шумов измерений,  $\mathbf{q}$  — вектор шумов модели,  
 $j$  — отсчет времени,  $\tilde{\mathbf{X}}$  — вектор оценки параметров модели.





## 2. Теория Обработка измерений

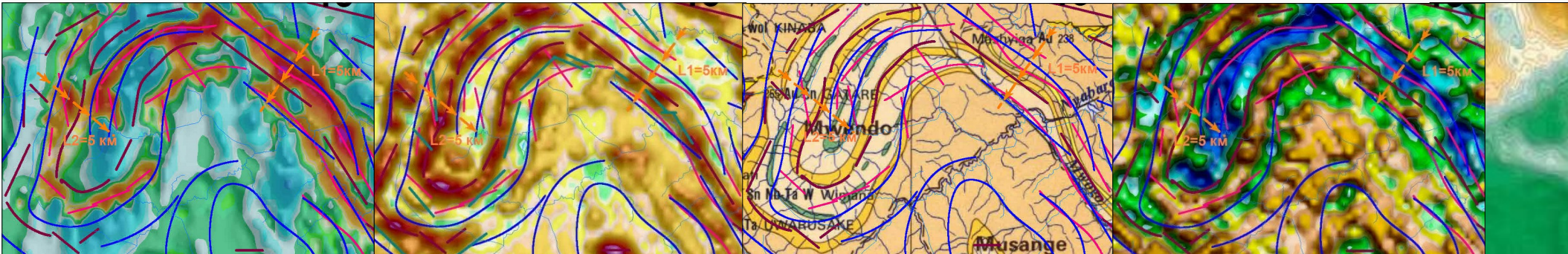
### Решение линейных задач

- 1) Калмановский подход
- 2) Робастный подход
- 3) Анизотропийный подход

$$\mathbf{Z}_{(j)} = \mathbf{H}_{(j)} \mathbf{X}_{(j)} + \mathbf{r}_{(j)}.$$

$$\mathbf{X}_{(j+1)} = \mathbf{F}_{(j)} \mathbf{X}_{(j)} + \mathbf{q}_{(j)}.$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{(j)}: \|\mathbf{X}_{(j)} - \tilde{\mathbf{X}}_{(j)}\| \rightarrow \min, \\ j=0, \dots, N$$





## 2. Теория Обработка измерений

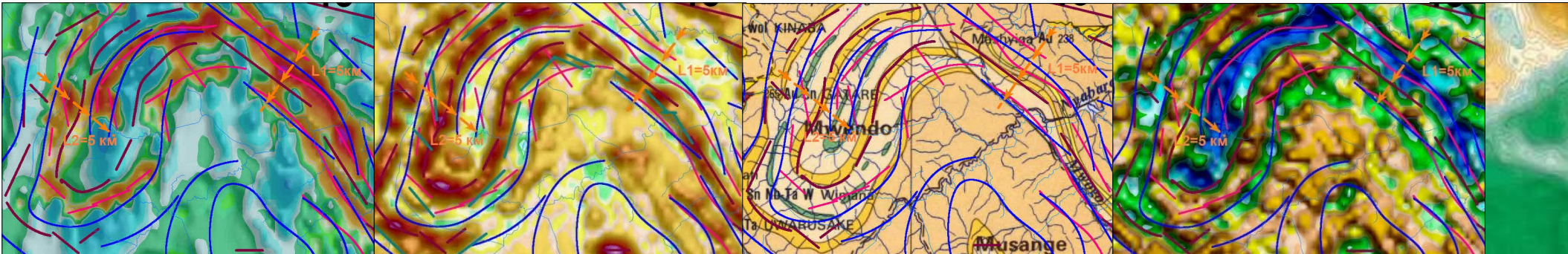
### Решение нелинейных задач

- 1) Калмановский подход
- 2) Анизотропийный подход

$$\mathbf{Z}_{(j)} = \mathbf{H}_{(j)}(\mathbf{X}_{(j)}, \mathbf{r}_{(j)}).$$

$$\mathbf{X}_{(j+1)} = \mathbf{F}_{(j)}(\mathbf{X}_{(j)}, \mathbf{q}_{(j)}).$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_{(j)}: \|\mathbf{X}_{(j)} - \tilde{\mathbf{X}}_{(j)}\| \rightarrow \min, \\ j=0, \dots, N$$







## 2. Теория Обработка измерений

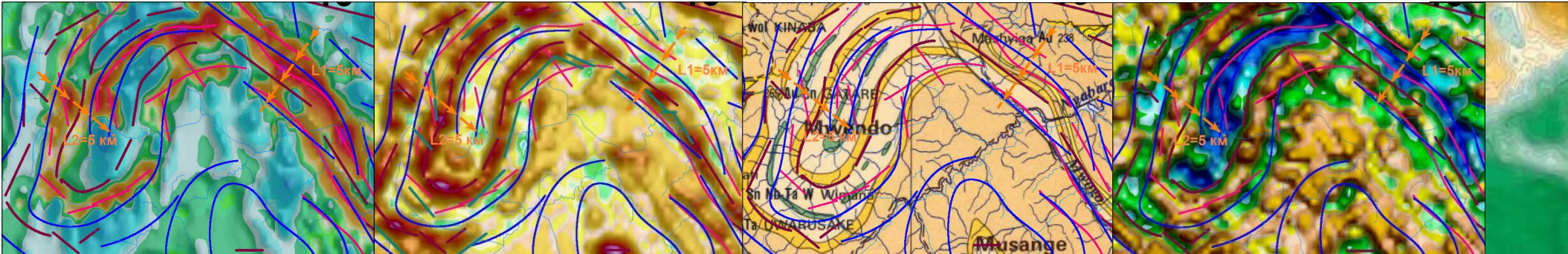
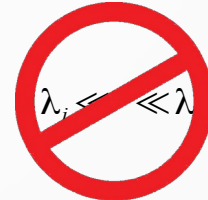
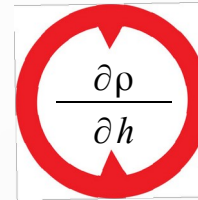
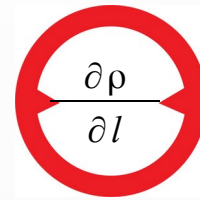
### Решение нелинейных задач (примеры)

Karshakov E. Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion // Exploration Geophysics. 2020. Vol. 51, Iss.1. P. 66-73.

1) Калмановский подход

*Итерационный обобщенный  
фильтр Калмана*

$$\tilde{\mathbf{x}}^+ = \tilde{\mathbf{x}}^- + \mathbf{P}^- \mathbf{H}^T [\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{P}^- \mathbf{H}^T]^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}^-)$$





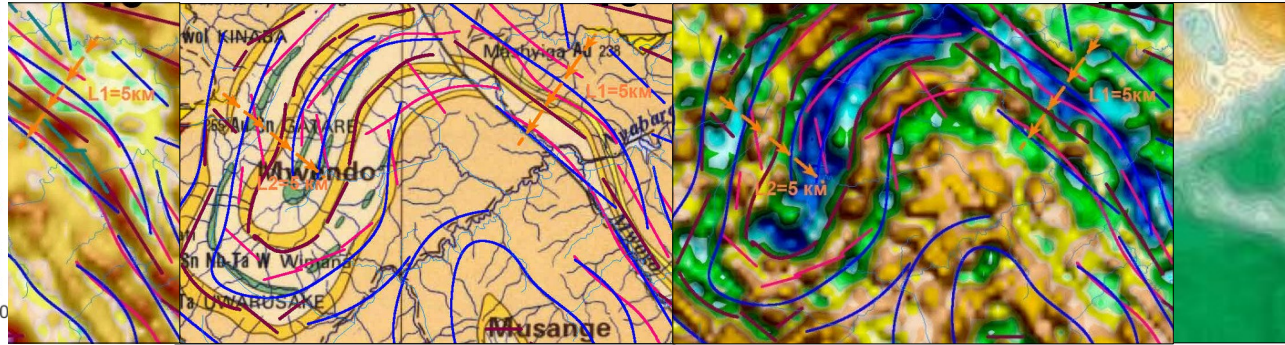
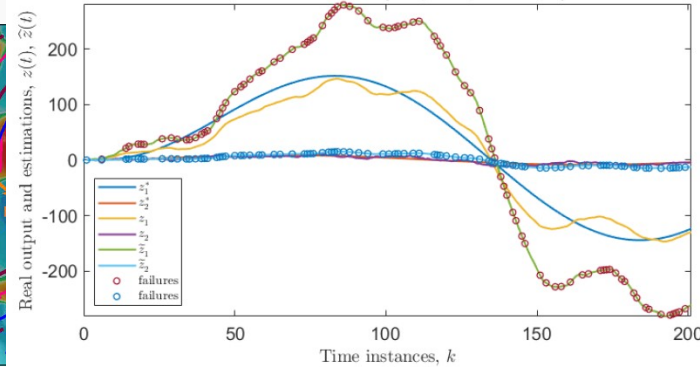
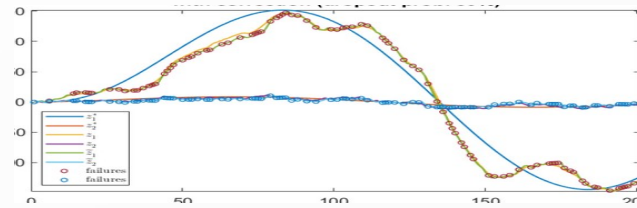
# 2. Теория Обработка измерений

## Решение нелинейных задач (примеры)

Belov I. Anisotropy-Based Estimation for Linear Discrete Time Varying Finite Horizon Systems with Missing Measurements / Proceedings of the 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'2020, Saint-Raphael, France). Saint-Raphael, France: IEEE, 2020. P. 832-837

2) Анизотропный подход

*Субоптимальный анизотропный фильтр для систем с мультипликативными шумами*





# 3. Практика Геофизика

## Основные внедрения:

Аэроэлектроразведочные комплексы ДИП4А, EM4Н, ЭКВАТОР

Магнитоизмерительные системы ГТ-МАГ, ГТ-МВС, программа аэромагнитной компенсации REINMAG

Инфракрасные аэросканеры ИКАР, VIS05, SCAN-T

Системы навигации и сбора данных ЛОЦМАН, TERM-D, NAVDAT

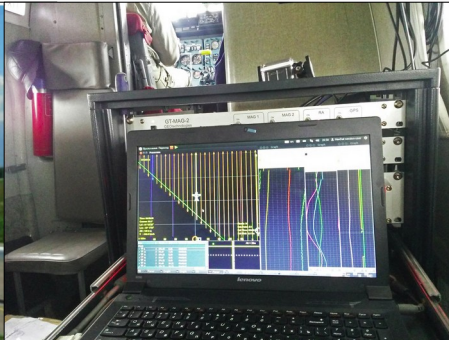
Электромагнитная система относительного позиционирования

Демонстрационный макет магнитоградиентной измерительной системы (НИР Обеспечение)

Стенд для экспериментальных исследований магнитоградиентной системы (НИР Обеспечение)

Компьютерный имитационный стенд для исследования состояния ДММ ПЛ (НИР Остов)

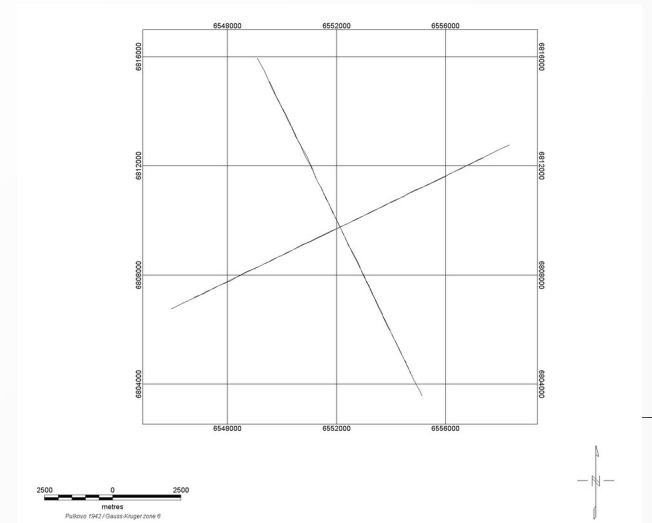
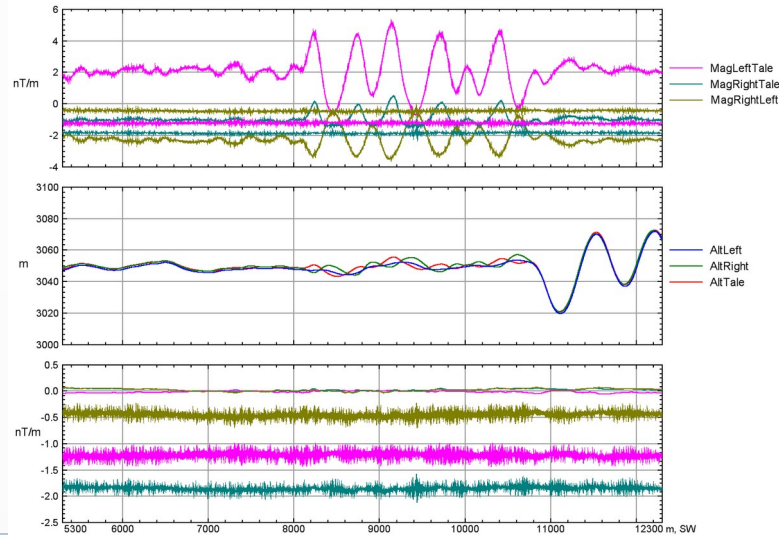
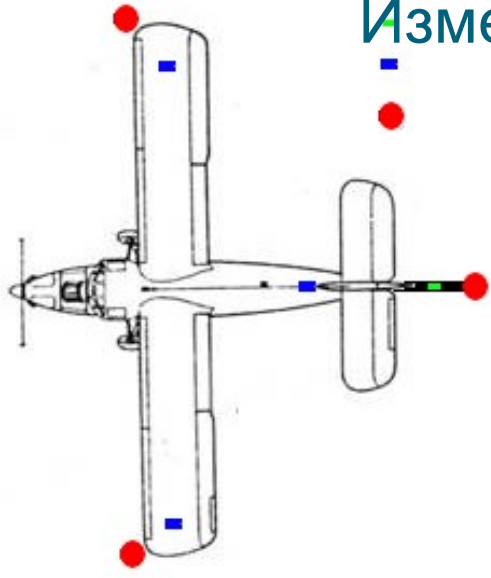
Компьютерный имитационный макет системы управления размагничиванием ПЛ (НИР Остов)





# 3. Практика Геофизика

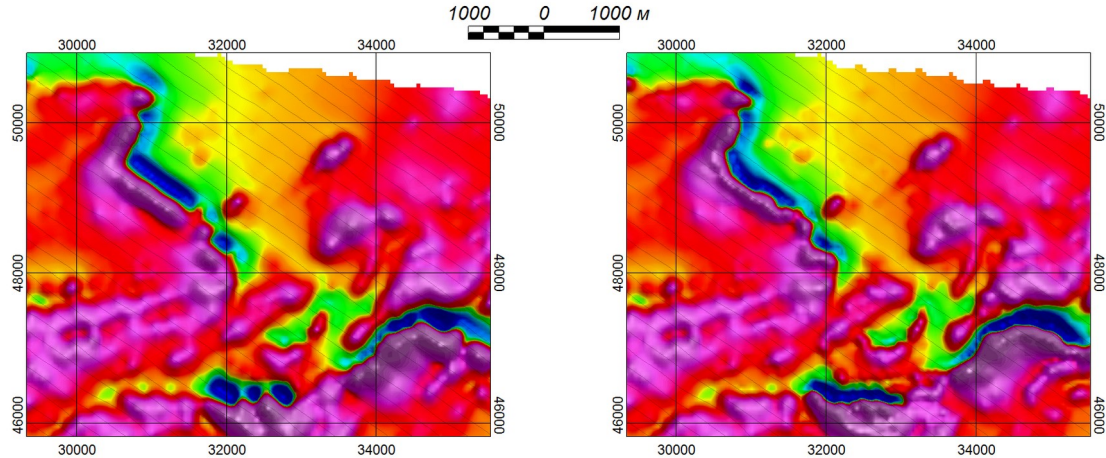
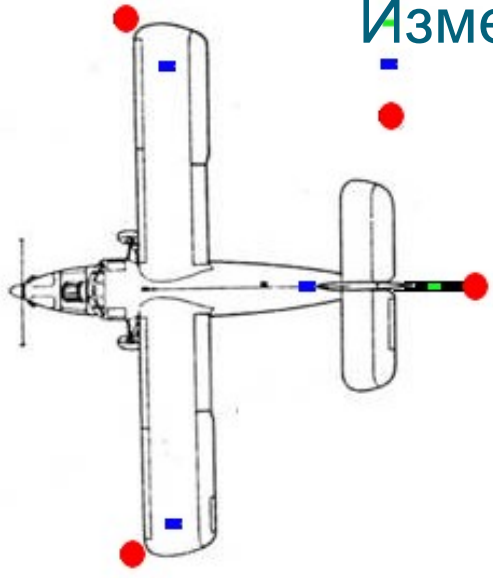
## Измерение градиента магнитного поля (ГТ-МАГ)





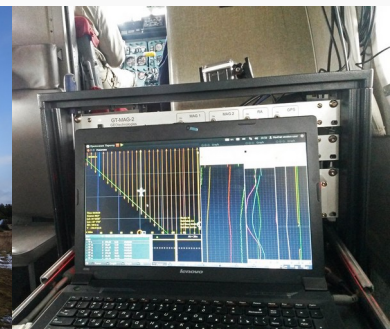
# 3. Практика Геофизика

## Измерение градиента магнитного поля (ГТ-МАГ)



Шкала раскраски величины полного вектора магнитной индукции, нТл

52486	53259	53319	53355	53403	56121
-------	-------	-------	-------	-------	-------





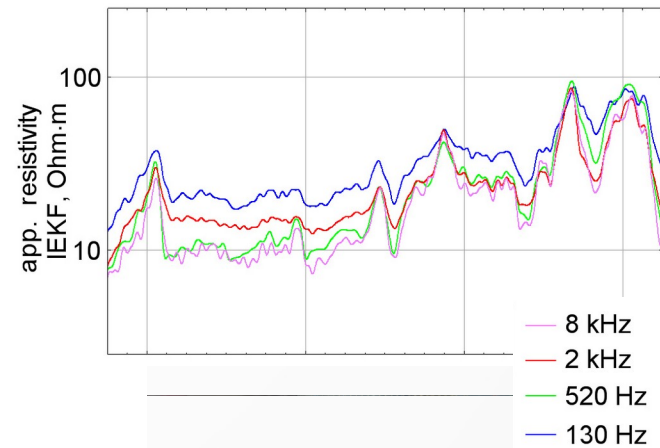
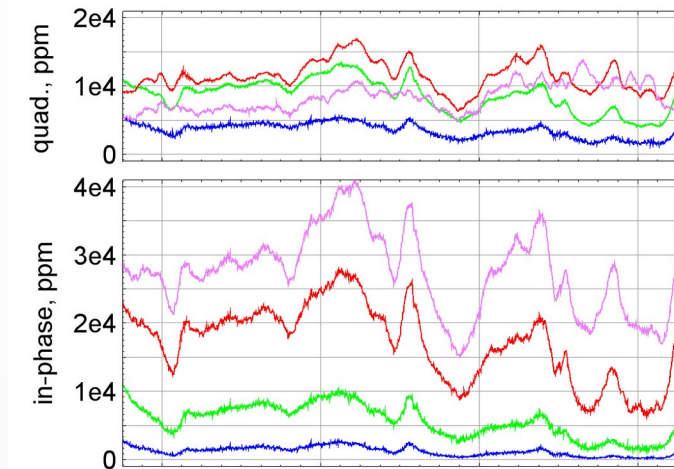
# 3. Практика Геофизика

## Измерение переменного магнитного поля (EM4H)

Выпускается серийно с 2007 г.  
(ООО «Геотехнологии»)

Применяется организациями:  
АО «ГНПП «Аэрогеофизика»  
ВСЕГЕИ  
АК «АЛРОСА»

Более 100 000 пог. км в год





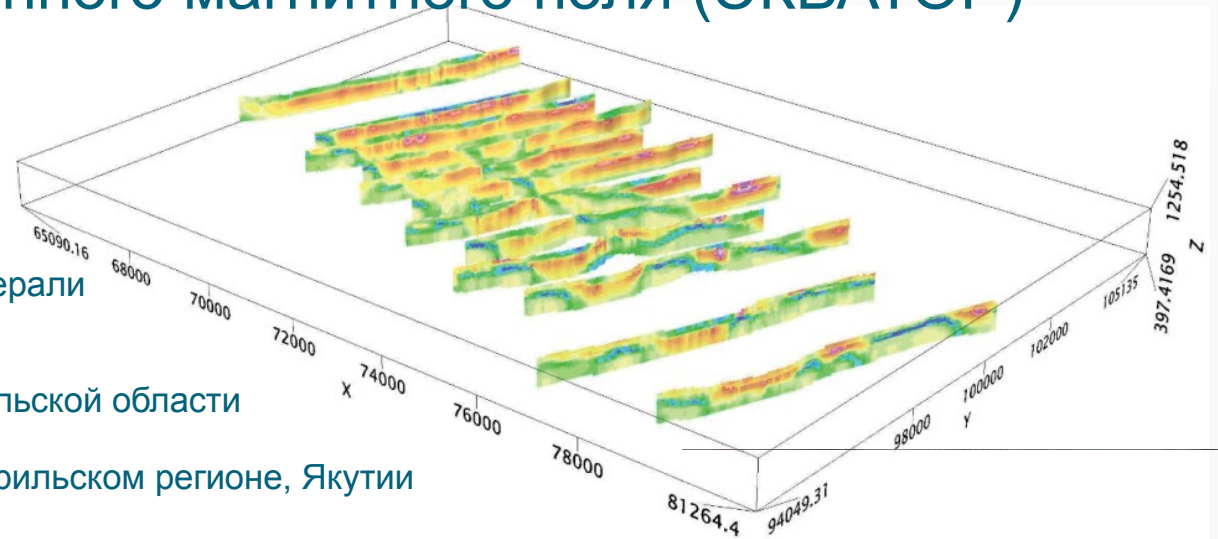
# 3. Практика Геофизика

## Измерение переменного магнитного поля (ЭКВАТОР)

Выпускается серийно с 2010 г.  
(ООО «Геотехнологии»)

Единственная в мире система,  
комбинирующая измерения во временной  
и в частотной области с высокой детальностью  
геофизической информации по глубине и по латерали

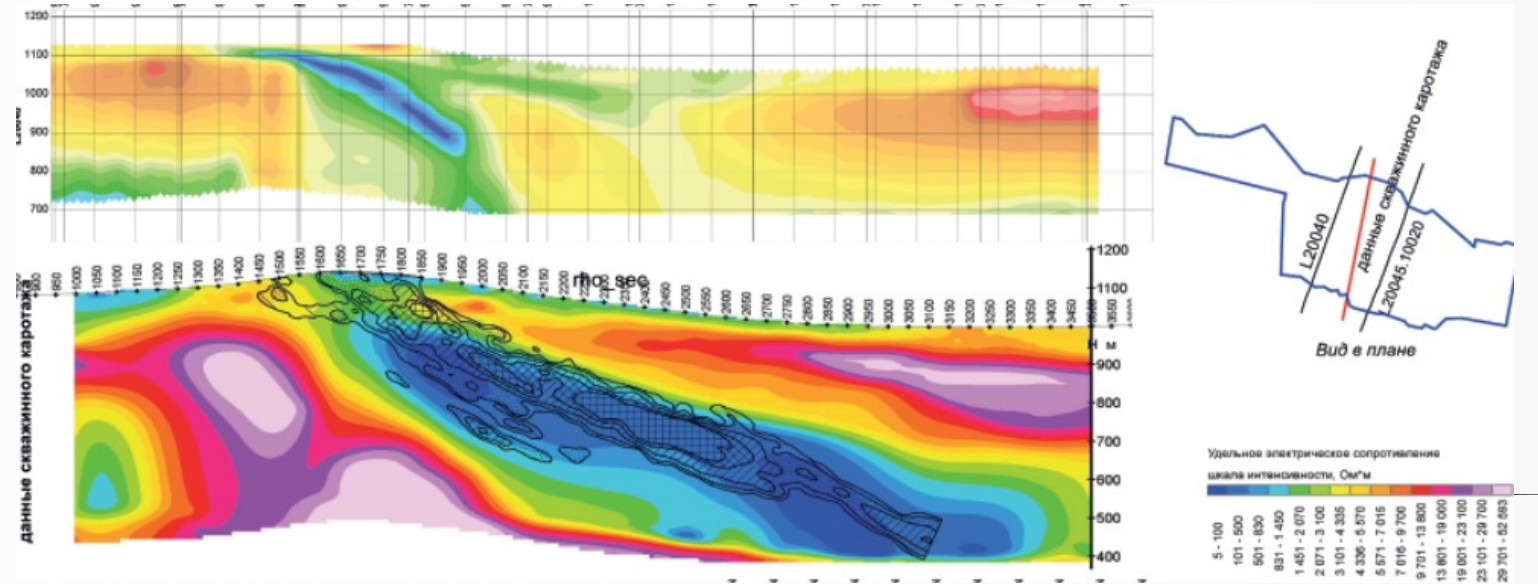
Применялась для поиска:  
Кимберлитов (алмазов) в Анголе, Якутии, Архангельской области  
Золота в Иркутской области, Якутии  
Полиметаллических месторождений в Руанде, Норильском регионе, Якутии  
Воды в Иркутской области и Якутии





# 3. Практика Геофизика

## Измерение переменного магнитного поля (ЭКВАТОР)



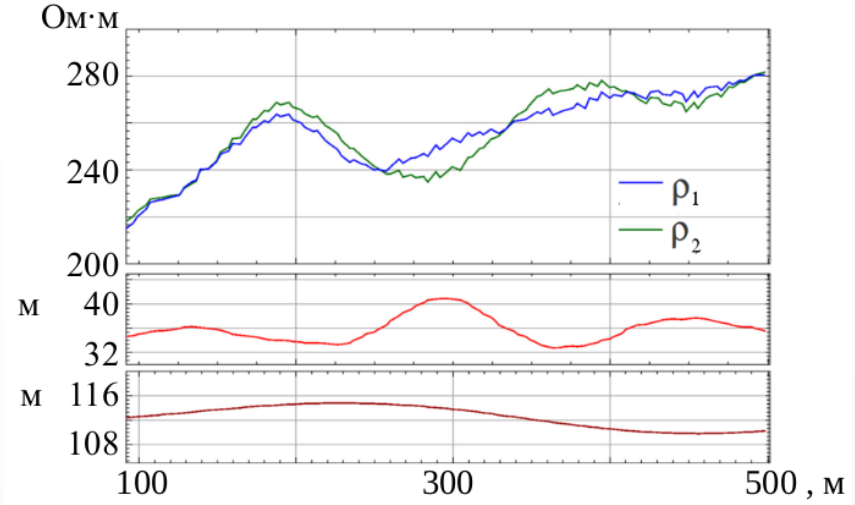
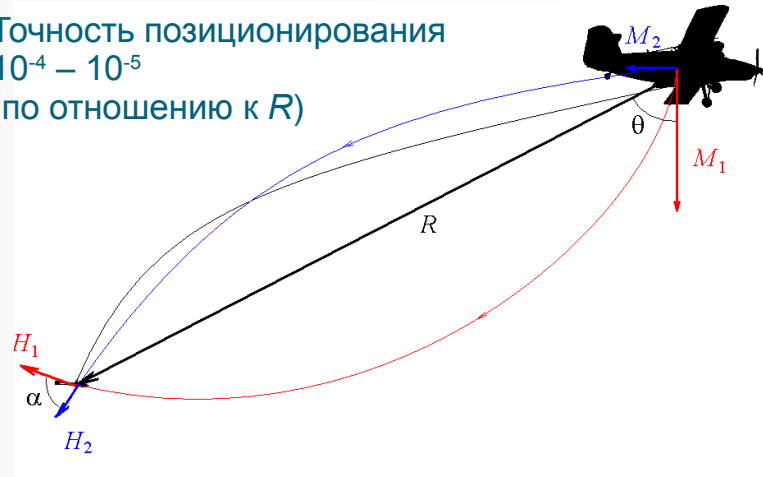




# 3. Практика Навигация

## Определение относительного положения (ЕМ4Н, ЭКВАТОР)

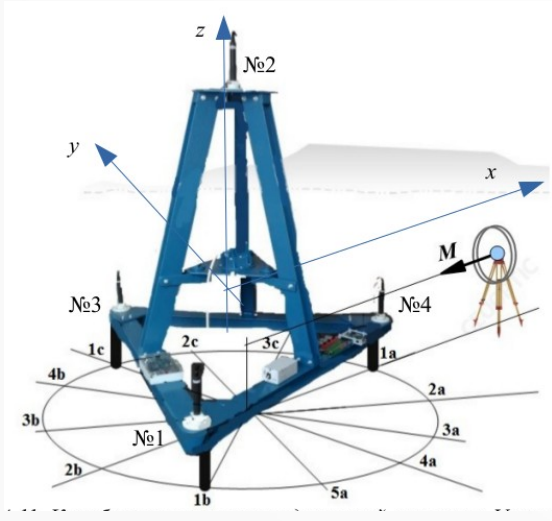
Точность позиционирования  
 $10^{-4} - 10^{-5}$   
(по отношению к  $R$ )





# 3. Практика Навигация

## Определение относительного положения (НИР Обеспечение)



$$\mathbf{x} = (\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, m_1, m_2, m_3)^T,$$

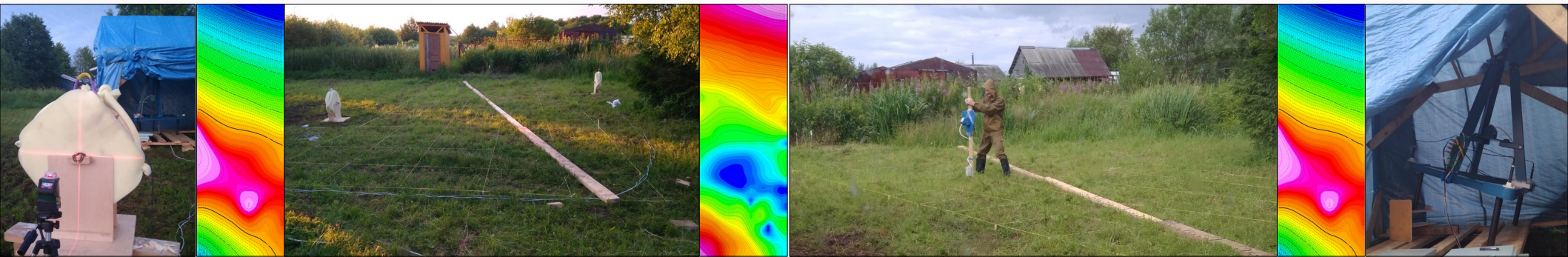
$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_s + \mathbf{x}, \quad \mathbf{X}_s = (r_{s1}, r_{s2}, r_{s3}, M_{s1}, M_{s2}, M_{s3})^T.$$

$$\mathbf{Z} = (Z_{121}, Z_{122}, Z_{123}, Z_{231}, Z_{232}, Z_{233}, Z_{241}, Z_{242}, Z_{243})^T.$$

$$\mathbf{G} = \{G_{ijk}\}, \quad G_{ijk} = B_{ik} - B_{jk}. \quad \mathbf{Z} = \mathbf{G}(\mathbf{X}_i) + \rho.$$

$$\mathbf{O} = \mathbf{M}_m \mathbf{M}_b^{-1}, \quad \mathbf{r}_{1b} = \mathbf{O}^{-1} \mathbf{r}_{1m}.$$

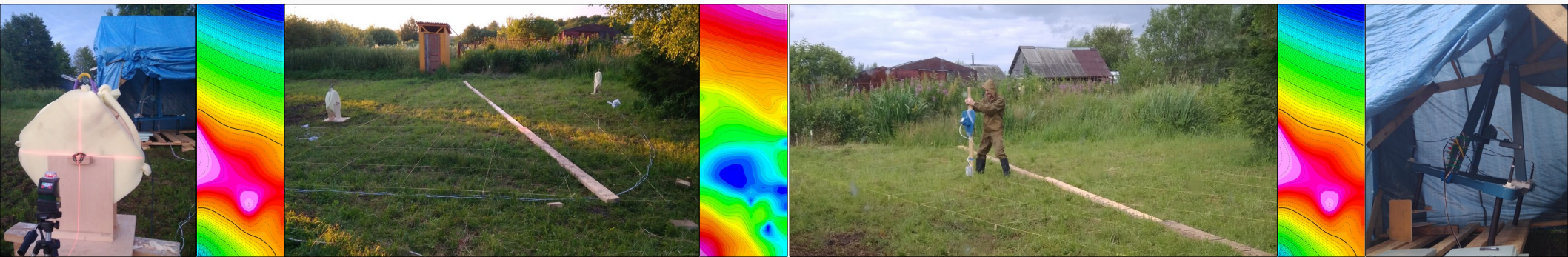
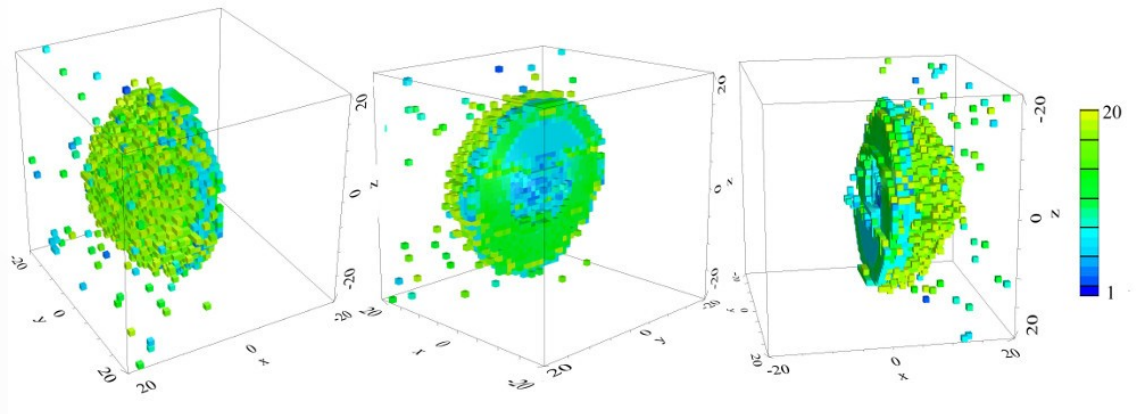
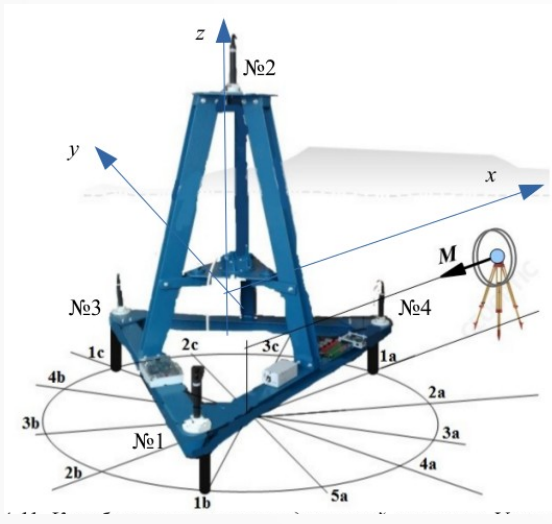
$$\mathbf{M}_* = \{\mathbf{e}_{1*}^M, \mathbf{e}_{2*}^M, \mathbf{e}_{**}^M\}, \quad \mathbf{e}_{**}^M = \mathbf{e}_{1*}^M \times \mathbf{e}_{2*}^M, \quad \mathbf{e}_{i*}^M = \frac{\mathbf{M}_{i*}}{M_{i*}}, \quad i = 1, 2,$$





# 3. Практика Навигация

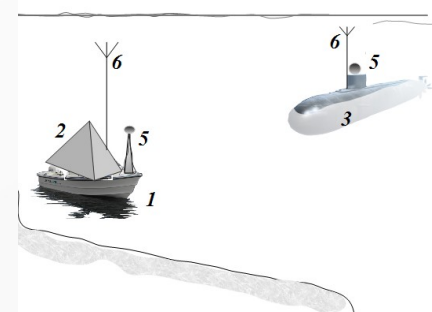
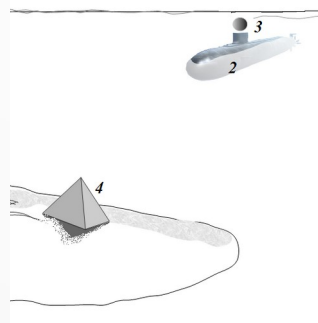
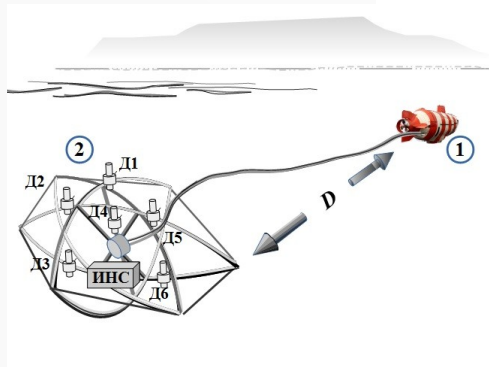
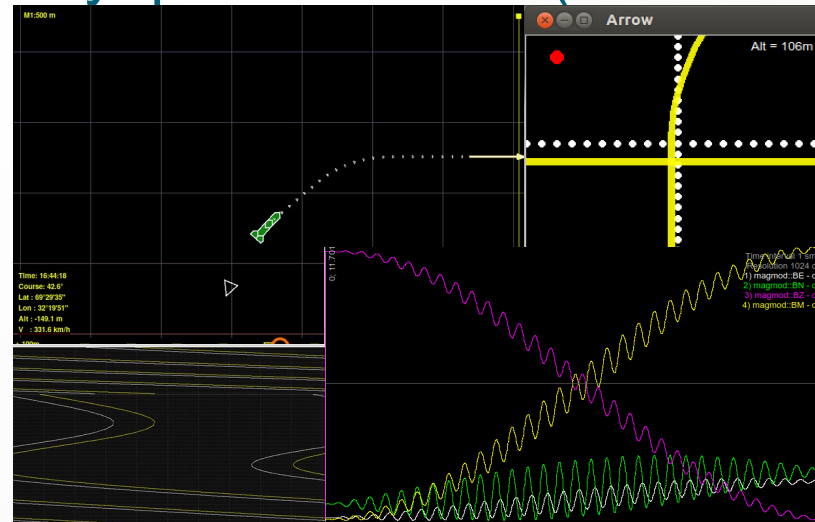
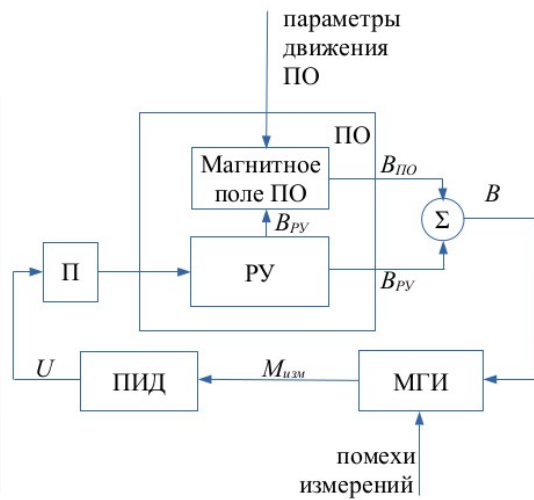
## Определение относительного положения (НИР Обеспечение)





# 3. Практика Навигация

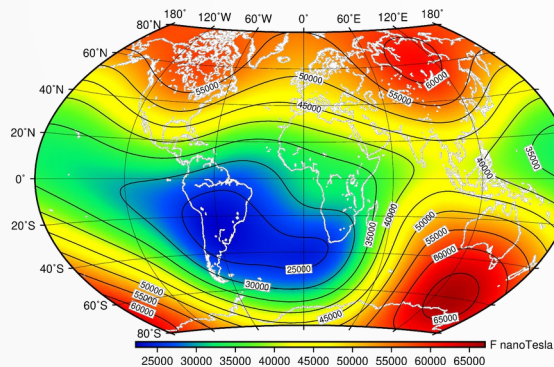
## Определение дипольного момента и управление им (НИР Остов)



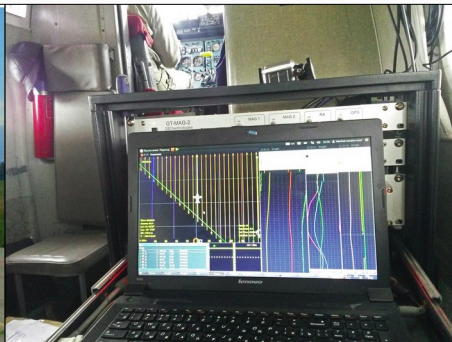


# 3. Практика Навигация

## Определение географического положения



Навигационные системы	Точность, м
ГНСС	1–10
КЭНС, Рельеф	30–50
КЭНС, фото поверхности	5–30
КЭНС, МПЗ	20(100)–500
КЭНС, ГПЗ	300–500



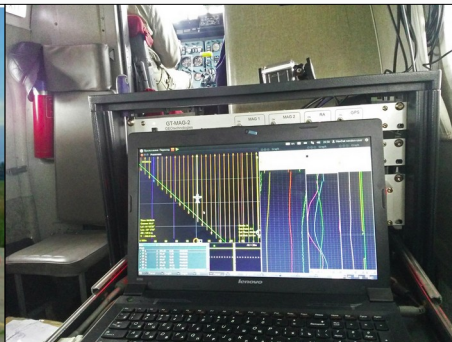


### 3. Практика Навигация

## Определение географического положения

$$Z = f_a(X) + \Delta f(t) \rightarrow z_j = H_j x_j + \Delta f_j$$
$$x = (\Delta x, \delta v, \beta, \Delta \omega, \Delta a)$$

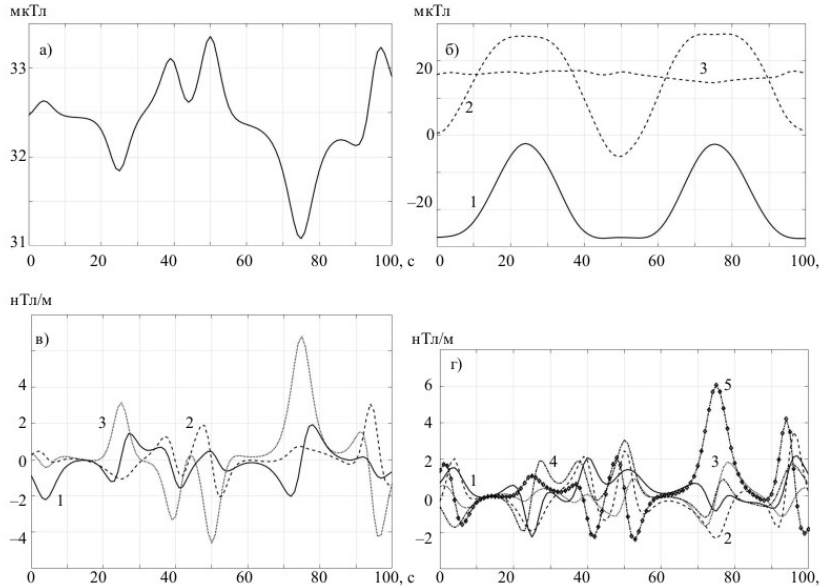
$$H_j = \left( \frac{\partial f_a(X_j)}{\partial X}, 0_{3 \times 3}, f_a(X_j), 0_{1 \times 6} \right)$$
$$H_j = \left( \frac{\partial f_a(X_j)}{\partial X}, 0_{5 \times 3}, K_{5 \times 3}(f_a(X_j)), 0_{5 \times 6} \right)$$



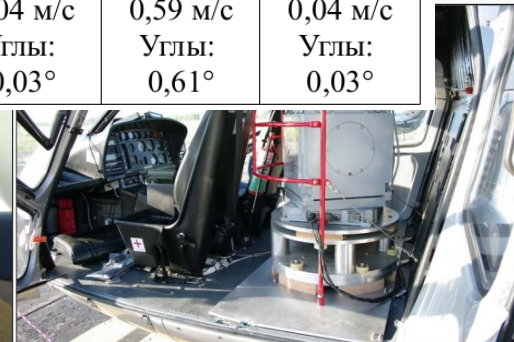
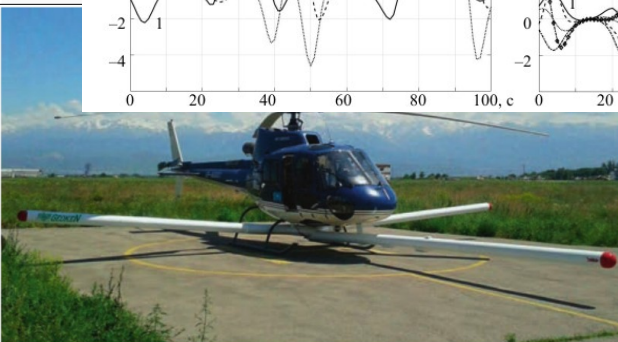


# 3. Практика Навигация

## Определение географического положения



класс точности БИНС	Тип корректирующей информации					
	$B$	$B-B_v$	$\mathbf{B}$	$\nabla B$	$\nabla \mathbf{B}^T$ феррозонд	$\nabla \mathbf{B}^T$ СКВИД
низкий	нет решения	Коорд.: 1,93 м Скор.: 0,68 м/с Углы: 2,8°	нет решения	Коорд.: 3,29 м Скор.: 0,58 м/с Углы: 0,8°	Коорд.: 27,5 м Скор.: 3,5 м/с Углы: 2,2°	Коорд.: 2,0 м Скор.: 0,29 м/с Углы: 0,5°
высокий	Коорд.: 4,88 м Скор.: 0,22 м/с Углы: 0,26°	Коорд.: 0,07 м Скор.: 0,02 м/с Углы: 0,10°	Коорд.: 1,03 м Скор.: 0,08 м/с Углы: 0,03°	Коорд.: 0,23 м Скор.: 0,04 м/с Углы: 0,03°	Коорд.: 11,8 м Скор.: 0,59 м/с Углы: 0,61°	Коорд.: 0,26 м Скор.: 0,04 м/с Углы: 0,03°





### 3. Практика Навигация

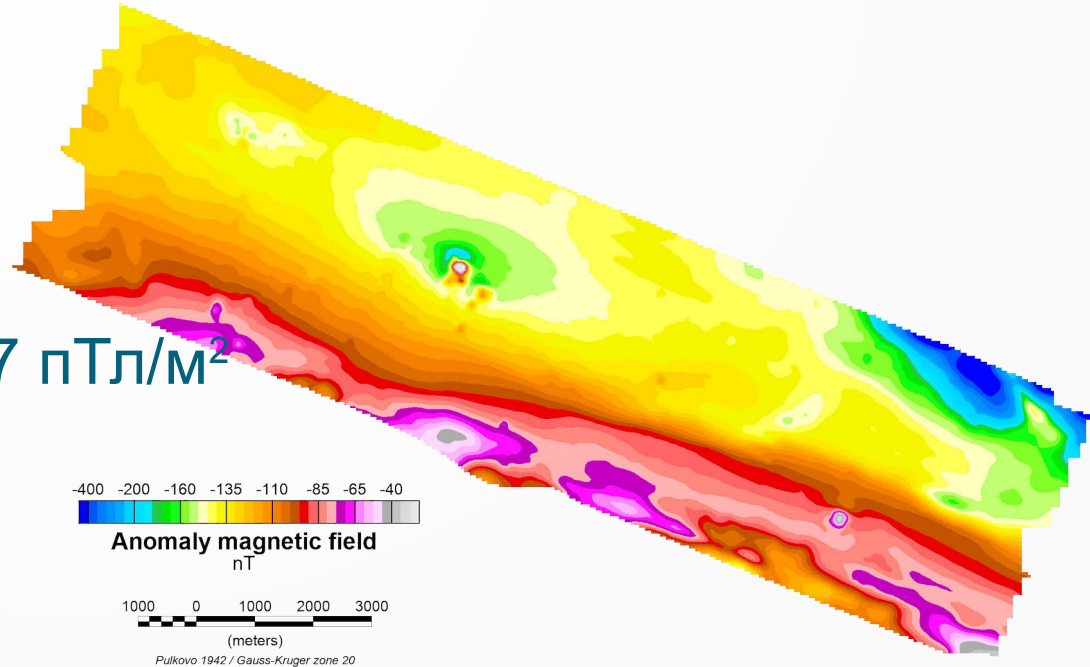
Результаты современной съемки: аэромагнитометрия

Интервал корреляции: 650 м

Высота съемки: 70 м

Средний градиент 2<sup>го</sup> порядка: 7 пТл/м<sup>2</sup>

При точности 10 пТл/м  
потенциальная точность 2 м  
(без осреднения)







### 3. Практика Навигация

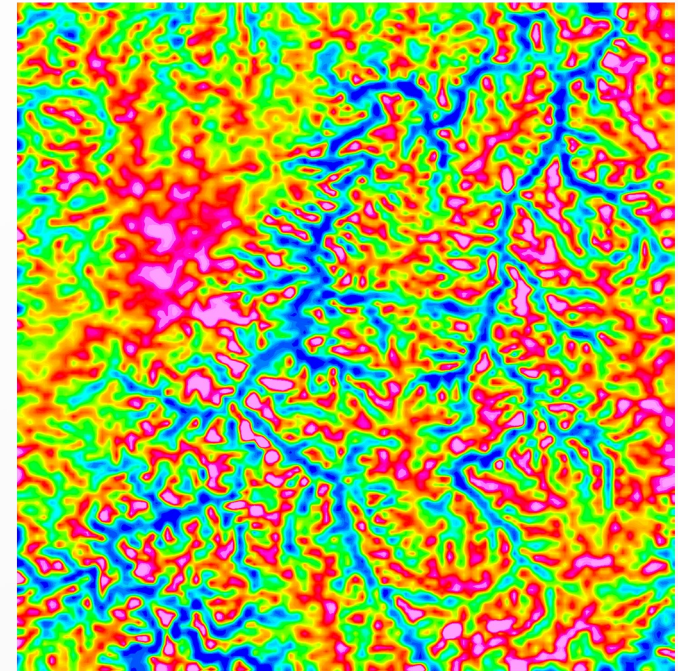
## Результаты современной съемки: аэрогравиметрия

Интервал корреляции: 2100 м

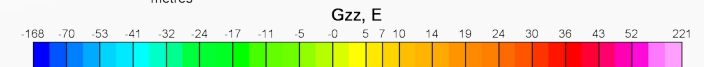
Высота съемки: 80 м

Средний градиент 2<sup>го</sup> порядка: 0.12 Э/м

При точности 2 Э  
потенциальная точность 17 м  
(3–5 с осреднение)



5000 0 5000 10000  
metres





### 3. Практика Навигация

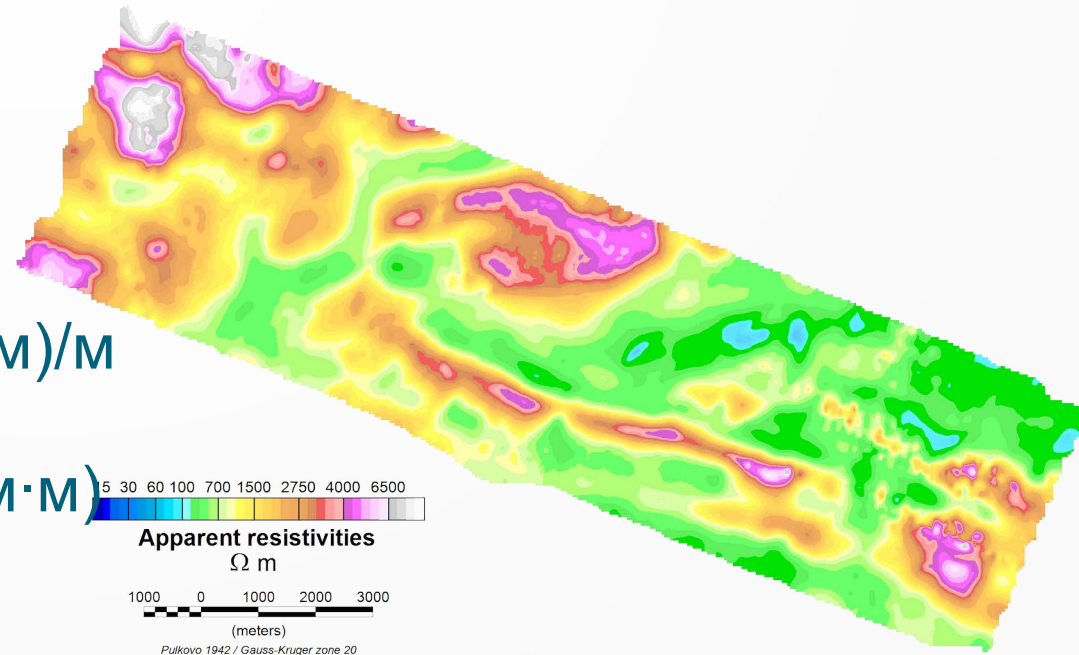
Результаты современной съемки: аэроэлектроразведка

Интервал корреляции: 1600 м

Высота съемки: 60 м

Средний градиент:  $0.006 \ln(\text{Ом}\cdot\text{м})/\text{м}$

При точности  $10^{-5} \leftrightarrow 0.025 \ln(\text{Ом}\cdot\text{м})$   
потенциальная точность 20 м  
(0.5 с осреднение)





## 4. Заключение Геофизика

1. Создан принципиально новый подход к созданию аэроэлектроразведочных систем
2. Разработаны отечественные системы измерения параметров магнитного поля и его градиента, превосходящие аналоги
3. Выработан новый подход к решению обратных задач геофизики
4. Разработаны методы определения дипольного магнитного момента по измерениям градиента магнитного поля



## 4. Заключение

### Навигация и управление

1. Электромагнитные системы относительного позиционирования перспективны для различных применений
2. Управление магнитным состоянием ПЛ в реальном времени существенно повышает скрытность по магнитному полю
3. Пространственные поля могут обеспечить точность ГНСС при использовании современных средств:
  - магнитные градиентометры
  - гравитационные градиентометры
  - активная и пассивная электроразведка
4. Магнитоградиентная навигация уже доступна



## 4. Заключение Перспективы

1. Применение анизотропийных подходов к решению некорректных задач
2. Решение трехмерных обратных задач с использованием распределенных вычислений
3. Создание мобильной магнитоградиентной измерительной системы для прикладных задач
4. Создание новых интегрированных навигационных систем
5. Создание систем размагничивания реального времени



## 4. Заключение Статистика

### Лаборатория 1

#### Состав

27 сотрудников: 20 нс, 7 итр.  
докторов наук — 4  
кандидатов наук — 13  
Планы на 2021:  
2 докторских,  
1 кандидатская

#### Публикации 2016-2020

всего — 356, из которых  
монографии — 7  
журналы WoS/Scopus — 81  
доклады WoS/Scopus — 58  
журналы RSCI — 71  
прочие статьи и доклады — 139

#### Хоздоговора 2016-2020

5 поисковых НИР, 10 сданных этапов на общую сумму 114 млн. руб.



# Теория и практика бортовых измерений физических полей в задачах навигации и геофизики

Спасибо!

