

Волковицкий А.К.

*Аэроэлектроразведка:
измерительные системы,
Методы, алгоритмы,
результаты*



ИСТОКИ

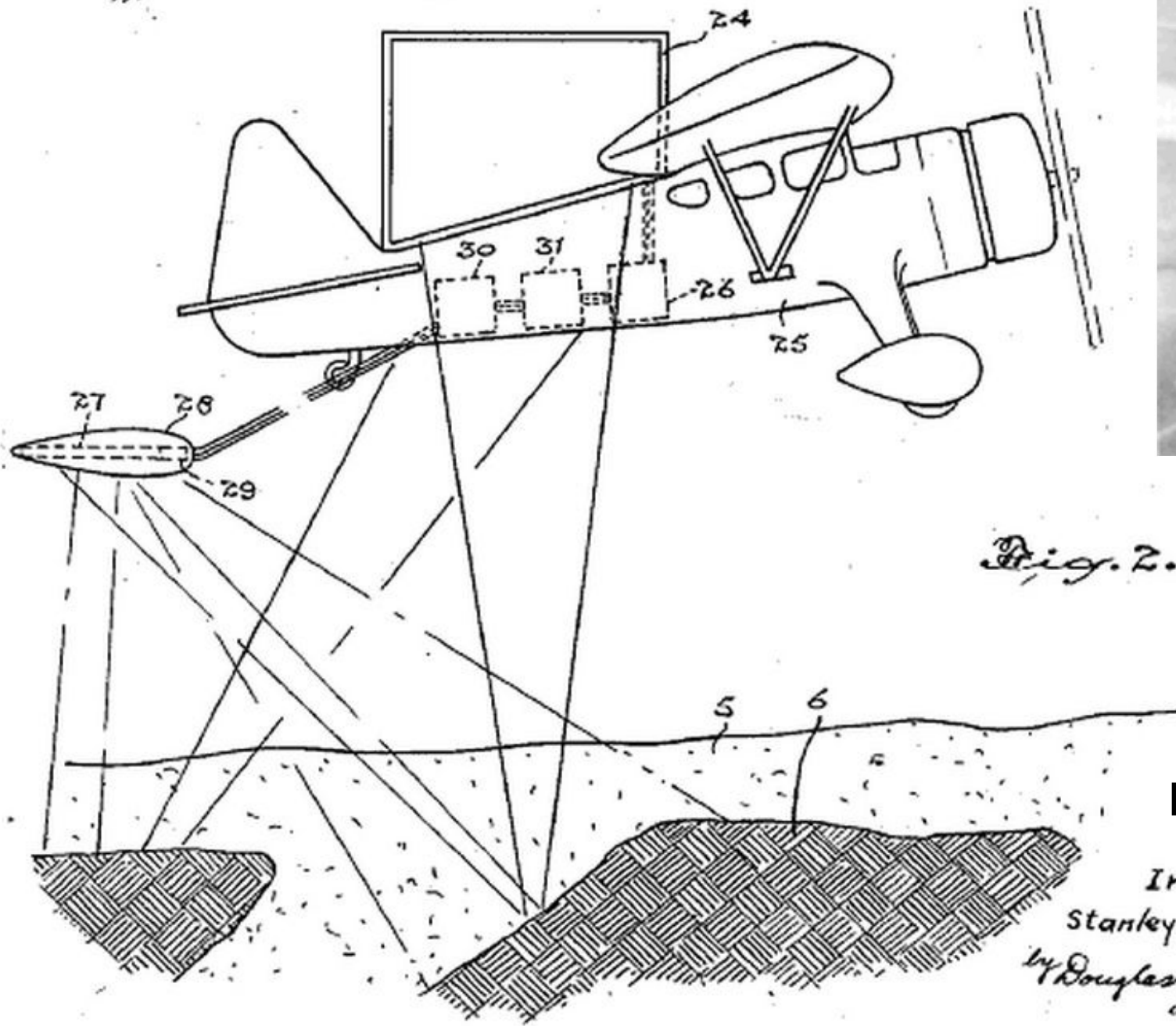


Time Magazine, May 5, 1947

“WINGED DIVINING ROD”

“Geophysicist Hans Lundberg of Toronto uses this Bell Helicopter, with special electromagnetic attachments to prospect for mineral deposits under Canadian forests and muskeg.”

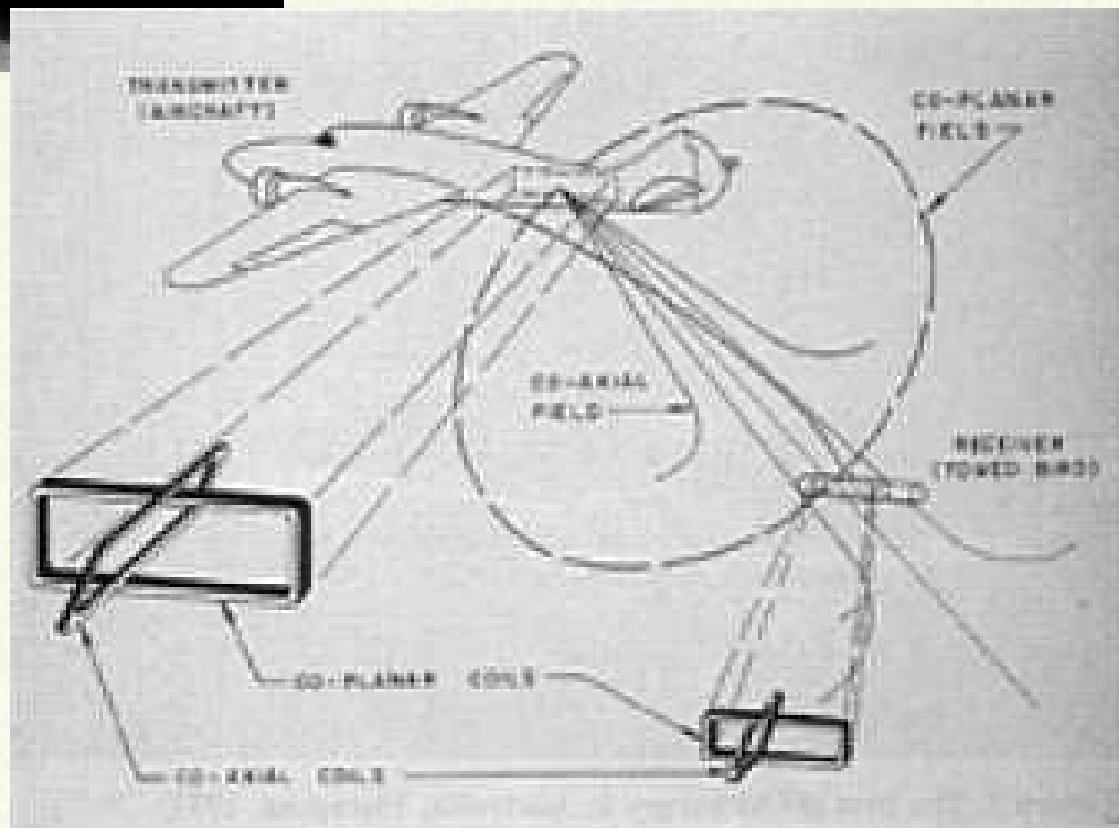
ИСТОКИ



Feb 13, 1948

Inventor
Stanley Davidson
by Douglas S. Johnson
Agent

ИСТОКИ



ИСТОКИ



INCO, 1950

Kidd Creek
115 млн. т: 10% Zn,
2,8% Cu 62,5 г/т Ag

Thompson Manitoba
(150 млн.т: 3% Ni),

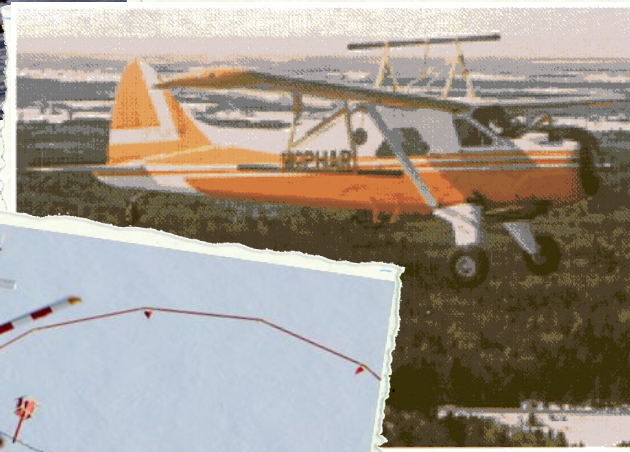
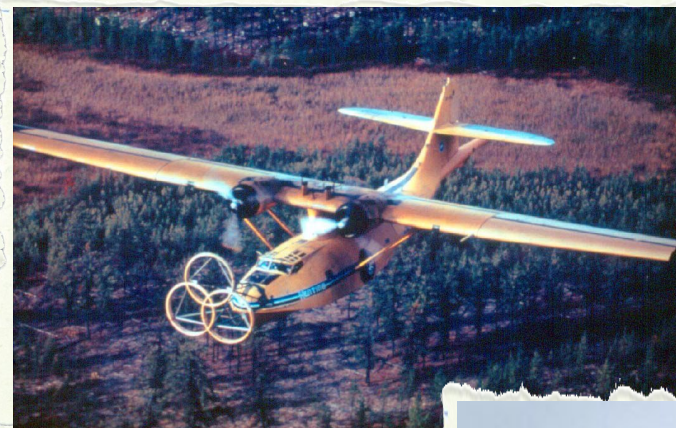
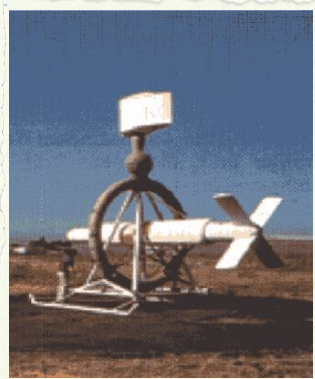
Heat Steele (20,7 млн.т:
4,79% Zn, 1,75% Pb, 1%Cu,
65 г/т Ag),

Casa Berardi
(10,5 млн.т: 8,2 г/т Au)

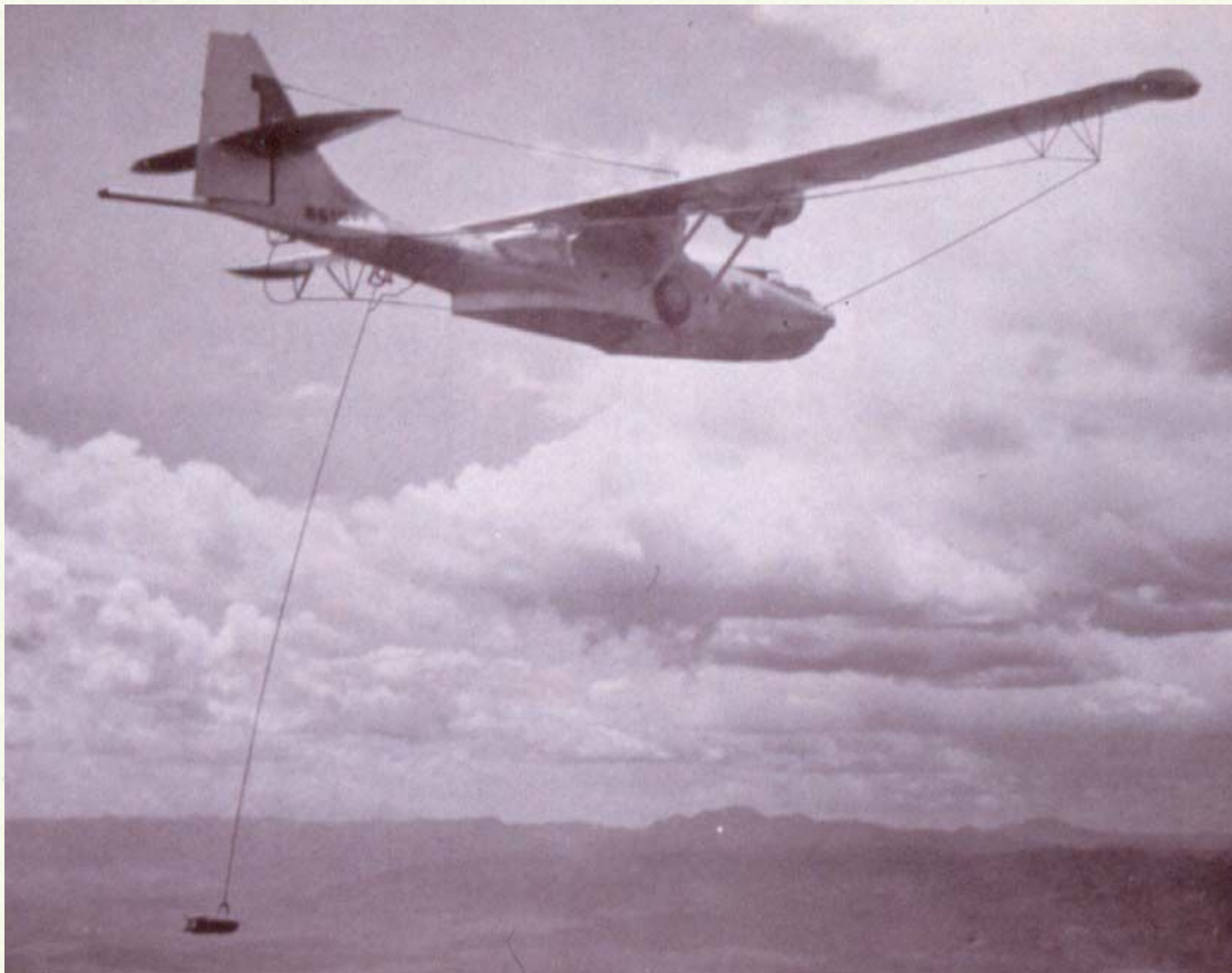


The Texas Gulf Sulphur HEM, 1964

Аэроэлектроразведочные комплексы



ИСТОКИ



INPUT – INduced PUIse Transient – by A.Barringer

ИСТОКИ



МПП-2 (Ф.М.Каменецкий)

ИСТОКИ

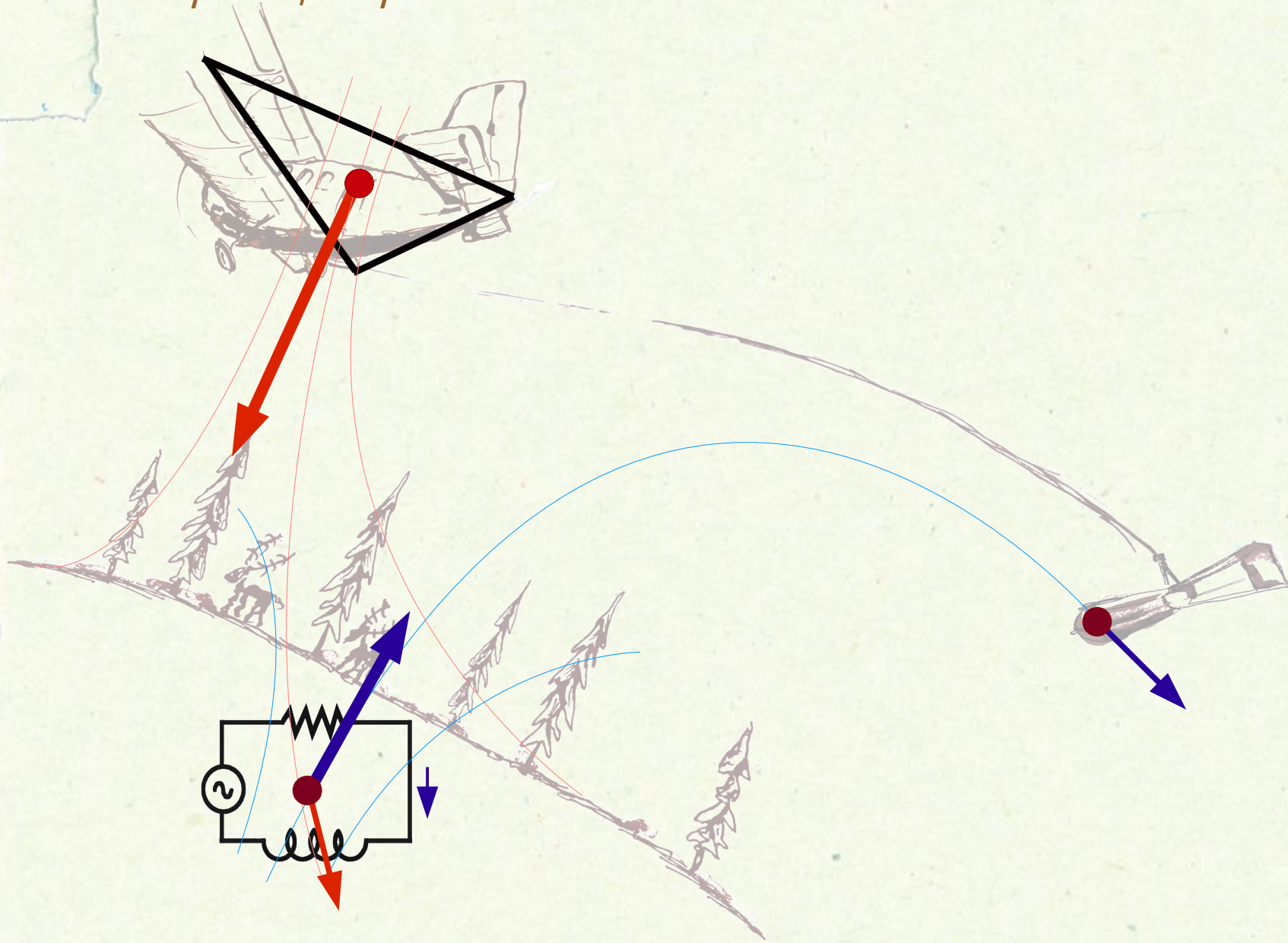


ДИП-А (Б.С.Светов, С.И.Петров, В.Д.Новак, В.И.Суцев)

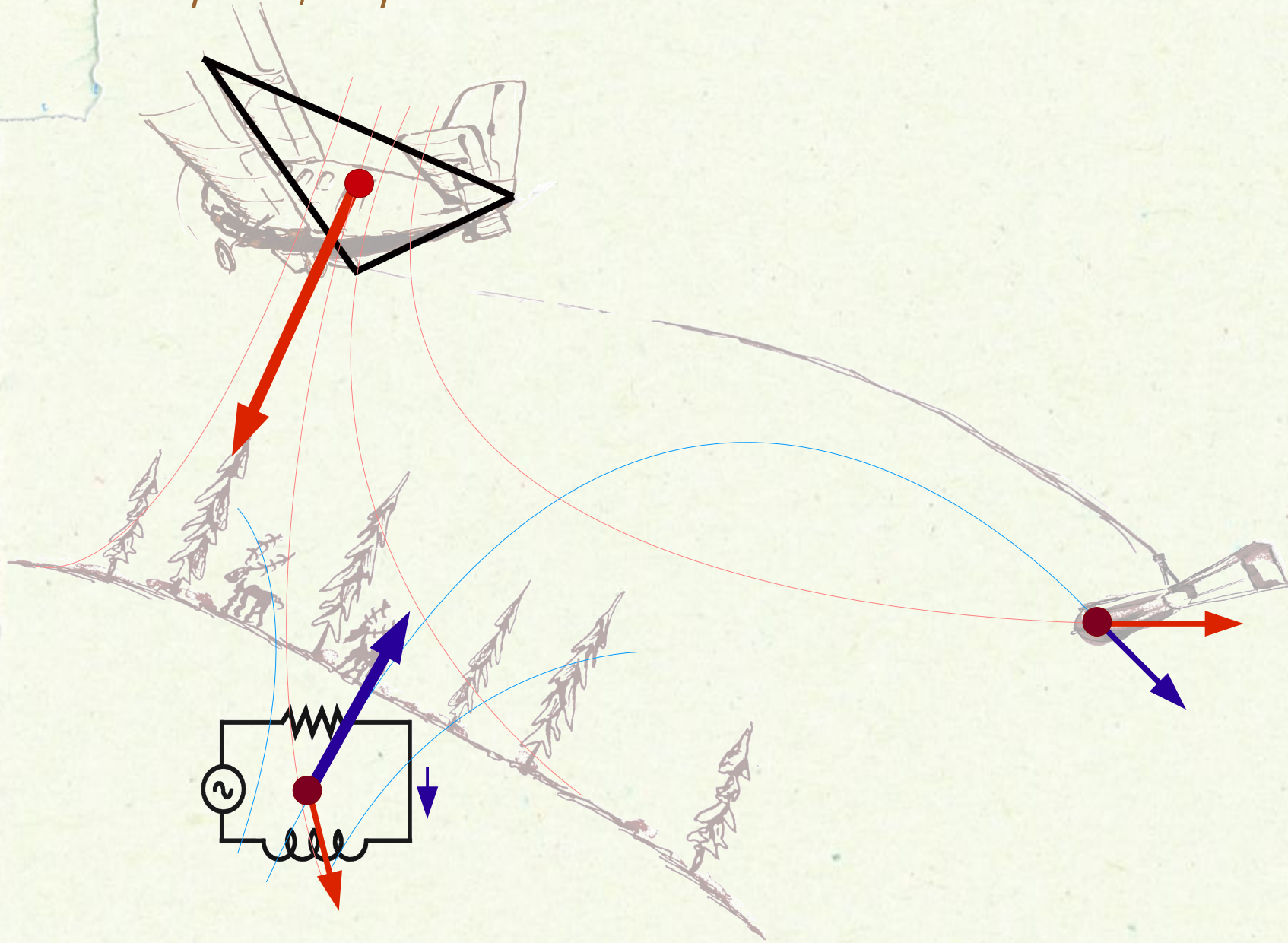
Принцип работы



Принцип работы

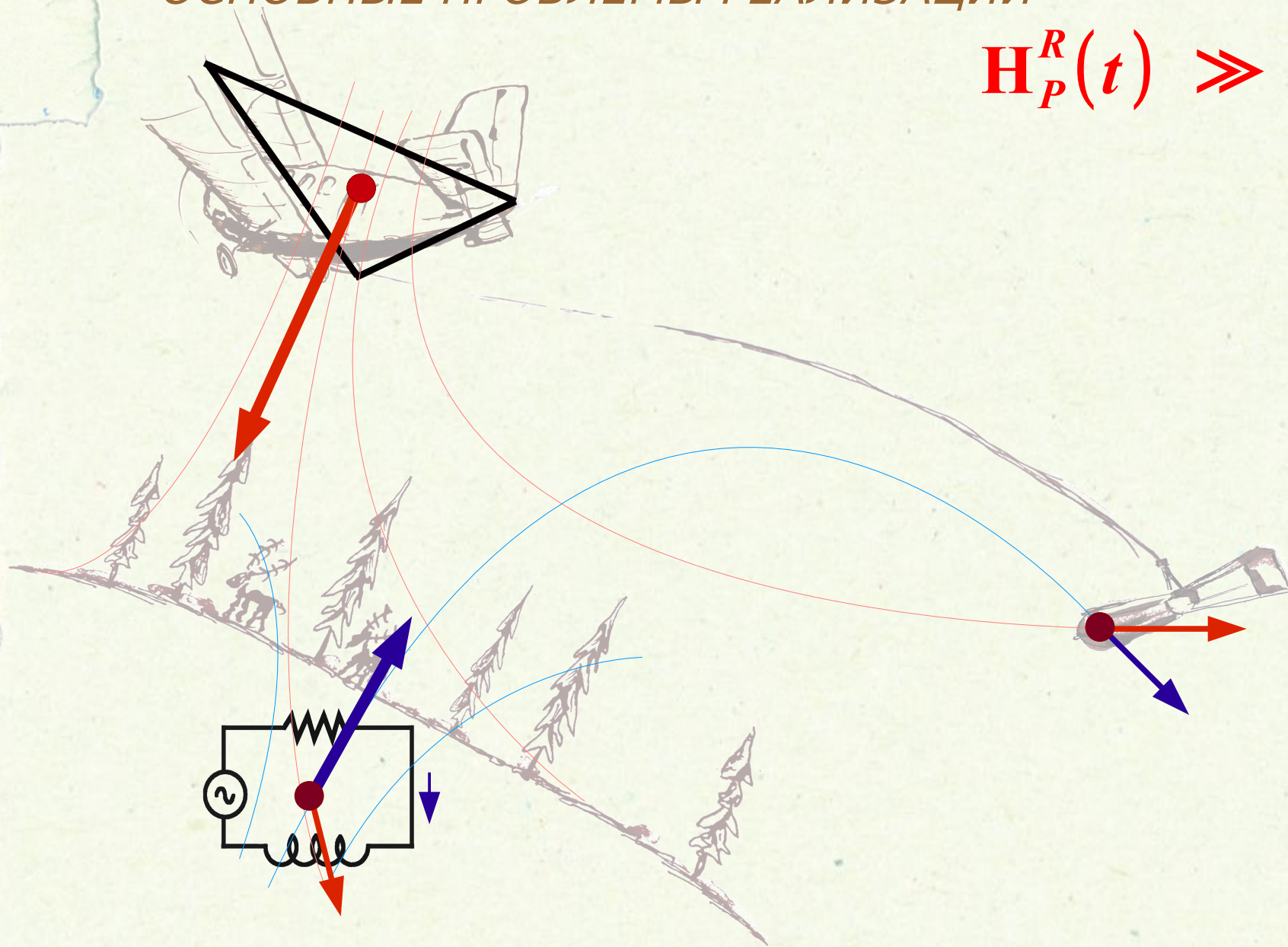


Принцип работы



ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

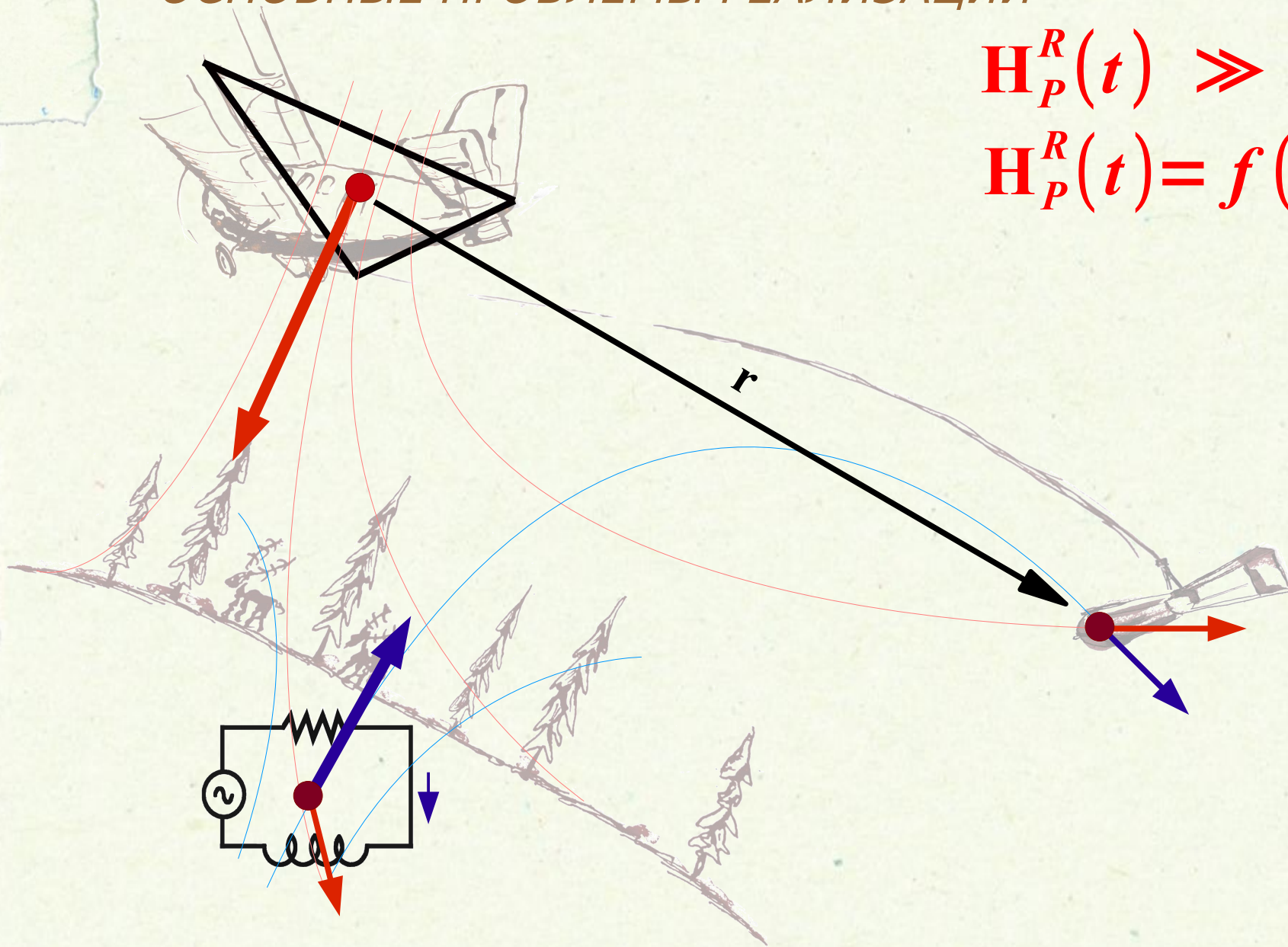
$$H_P^R(t) \gg H_I^R(t)$$



ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

$$H_P^R(t) \gg H_I^R(t)$$

$$H_P^R(t) = f(r)$$

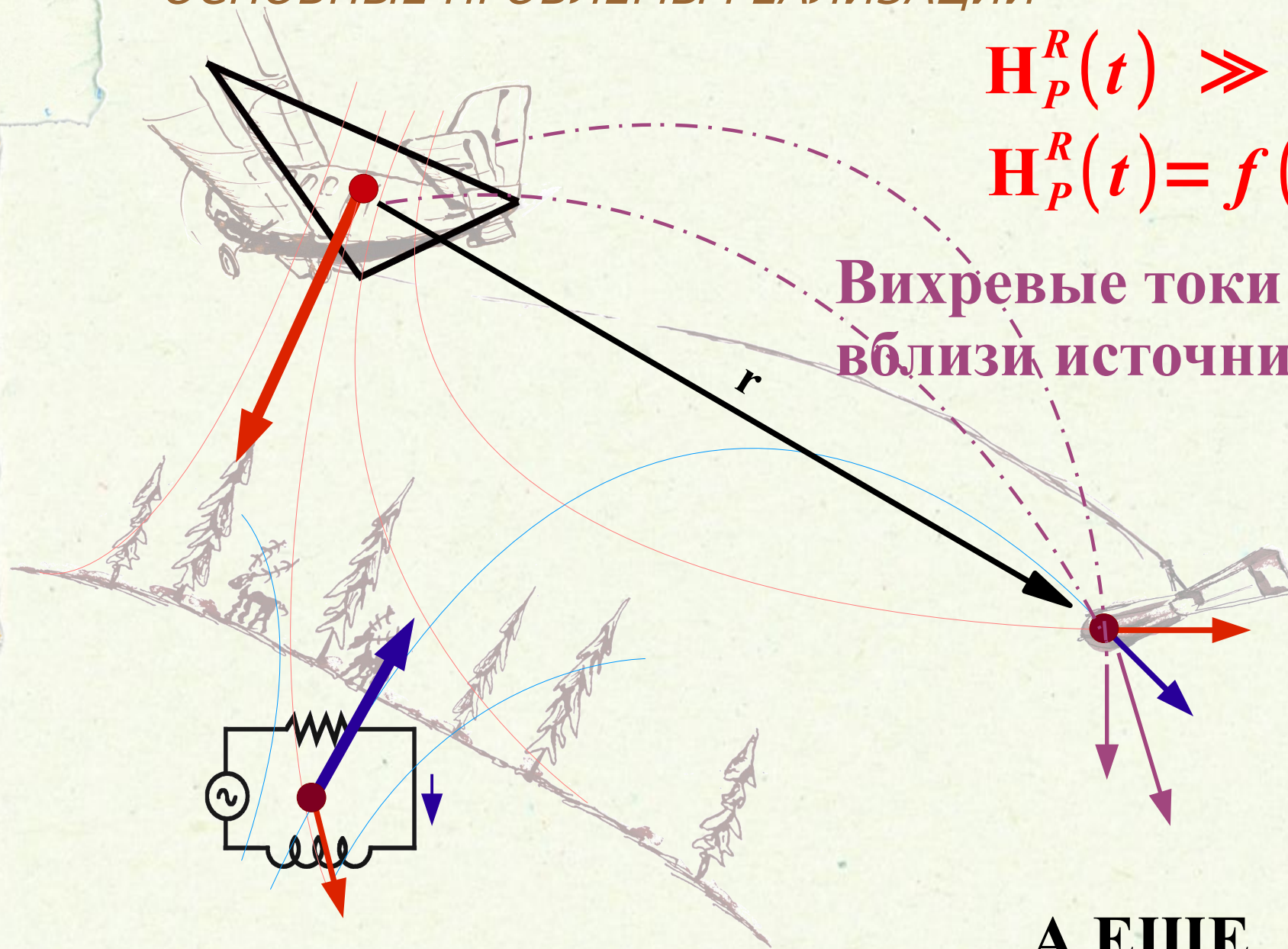


ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

$$H_P^R(t) \gg H_I^R(t)$$

$$H_P^R(t) = f(r)$$

Вихревые токи
вблизи источника



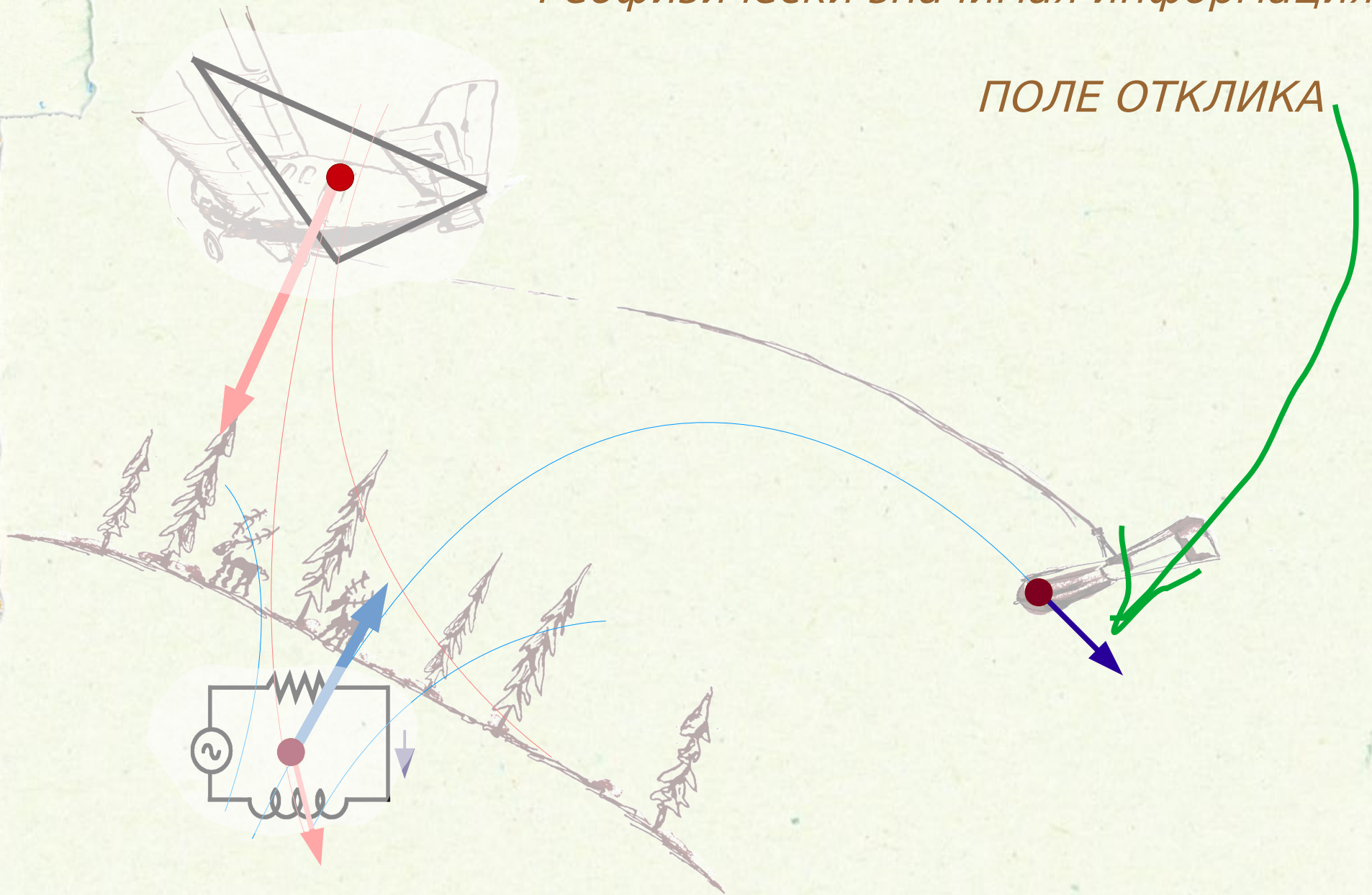
А ЕЩЕ...

Искажающие факторы

- *Тепловой шум;*
- *Неидеальность измерительных преобразований;*
- *Вибрации индукционного датчика в поле земли;*
- *Неконтролируемое изменение влияния первичного поля (геометрии зондирующей системы)*
- *Влияние эфира*

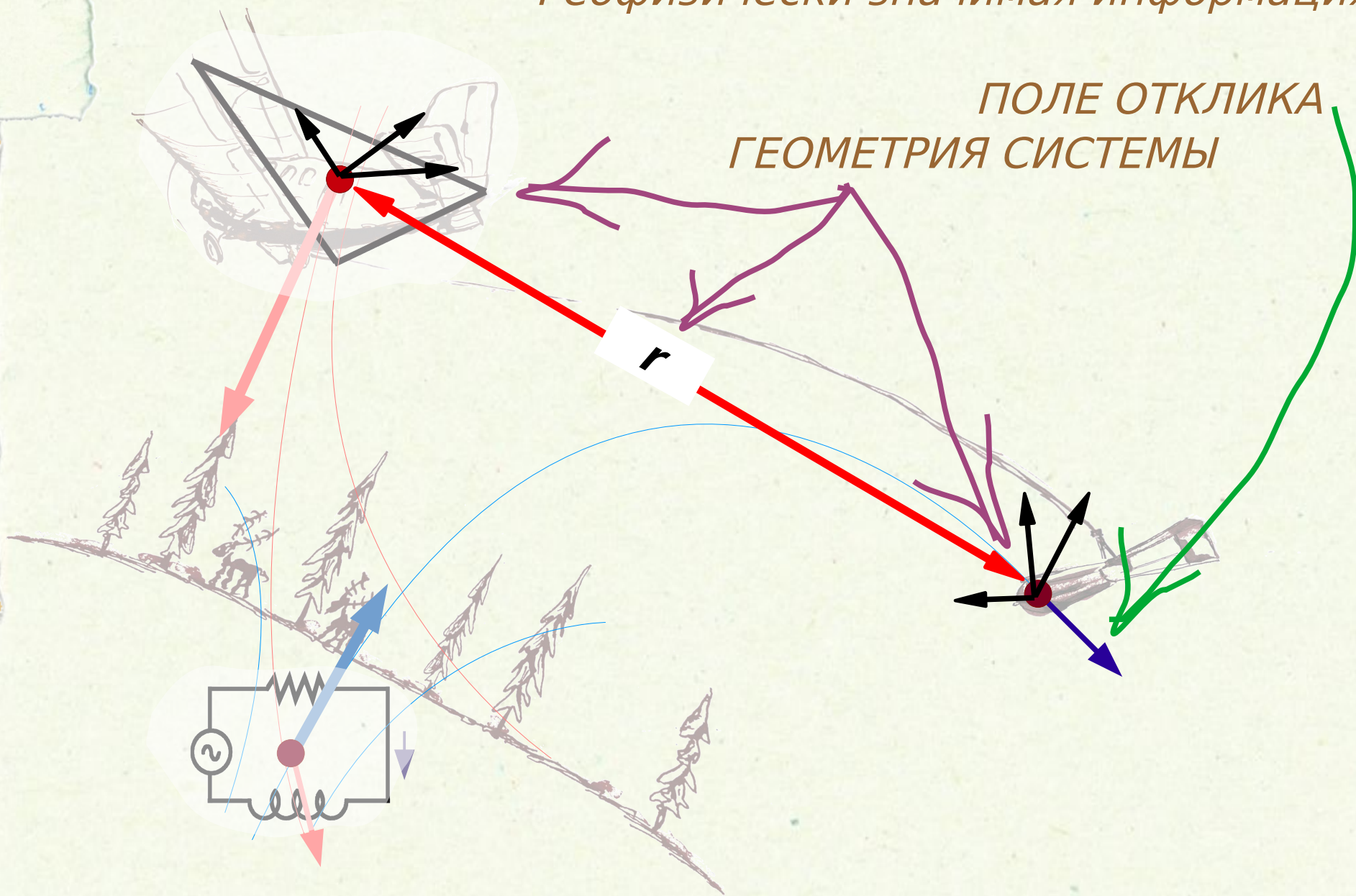
Геофизически значимая информация:

ПОЛЕ ОТКЛИКА



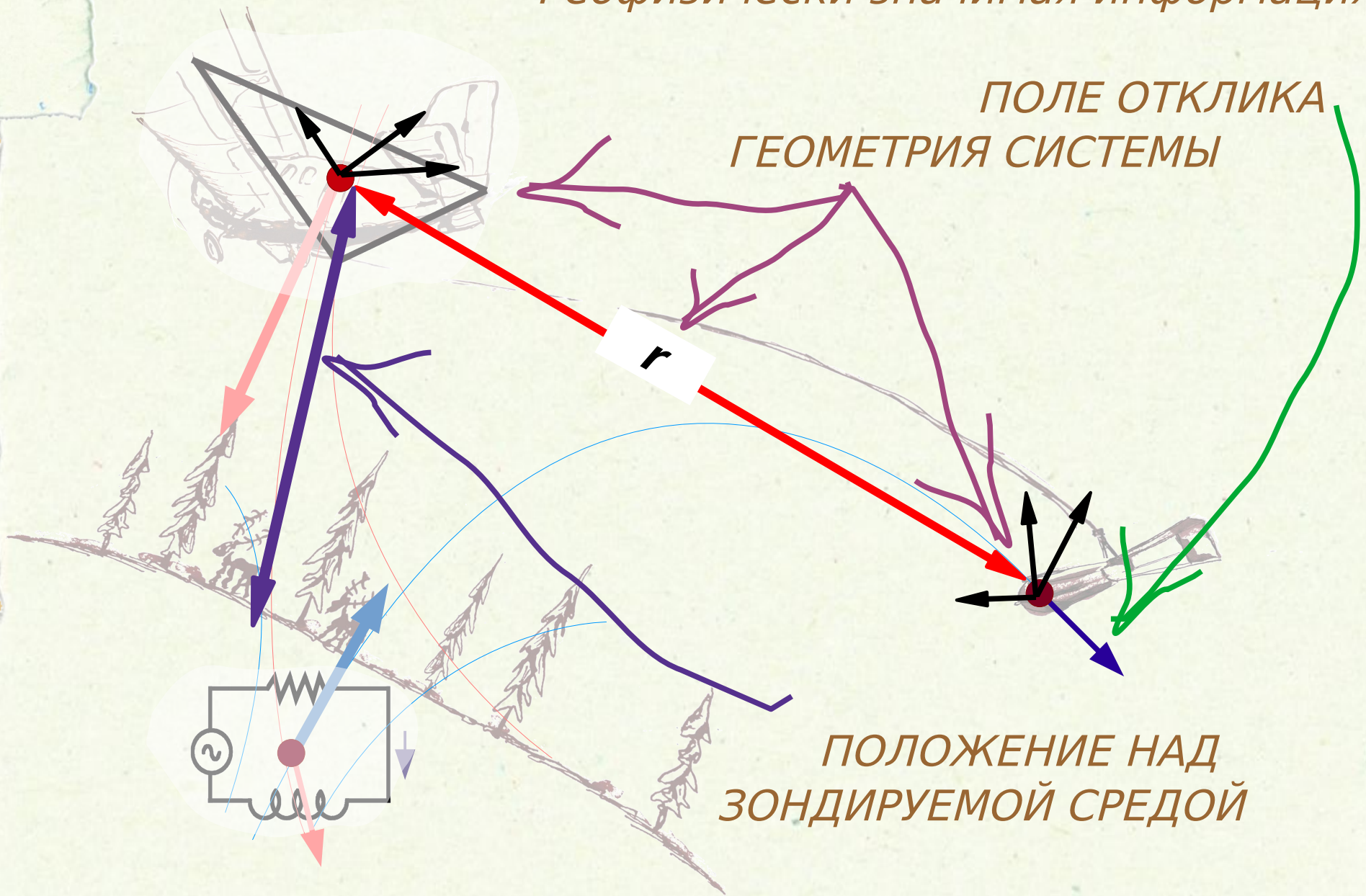
Геофизически значимая информация:

ПОЛЕ ОТКЛИКА
ГЕОМЕТРИЯ СИСТЕМЫ



Геофизически значимая информация:

ПОЛЕ ОТКЛИКА
ГЕОМЕТРИЯ СИСТЕМЫ



ПОЛОЖЕНИЕ НАД
ЗОНДИРУЕМОЙ СРЕДОЙ

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Основные задачи:

*ИЗБАВИТЬСЯ ОТ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ
ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ*

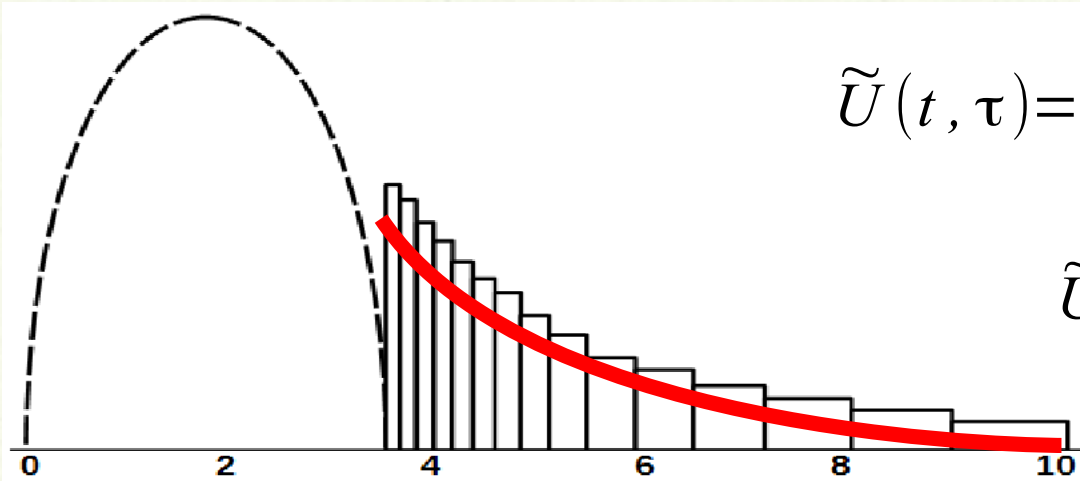
*ДОБИТЬСЯ СТАБИЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК*

*ОБЕСПЕЧИТЬ ПОЛНОТУ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ*

ОБЕСПЕЧИТЬ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ СЪЕМОК

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ

● Временные системы (временное накопление)

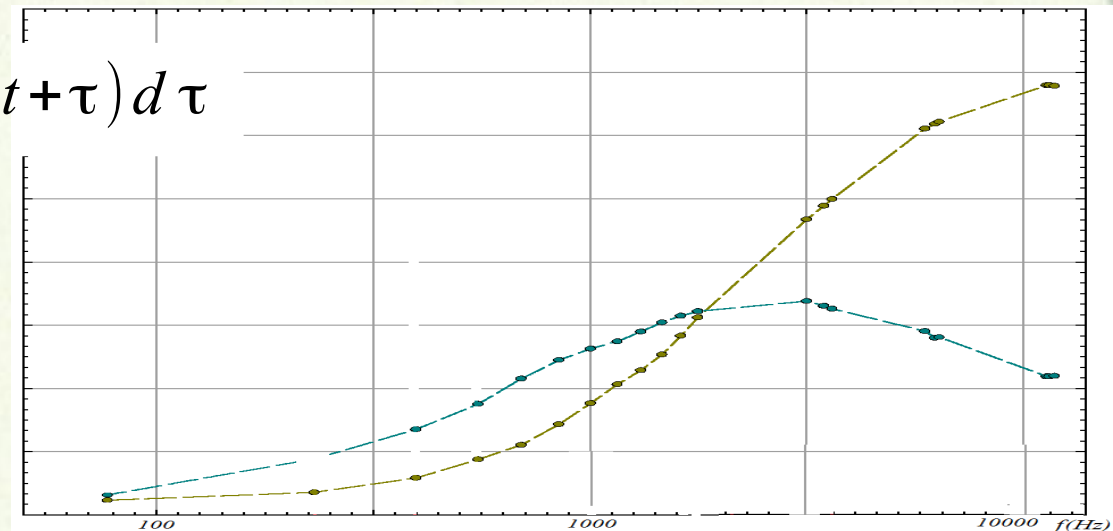


$$\tilde{U}(t, \tau) = \frac{1}{mT} \sum_{i=-m}^{m-1} (f(iT + \tau) u(t + iT + \tau))$$

$$\tilde{U}_i = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \tilde{U}(t, \tau) d\tau; \quad i = 1, 2, \dots, r$$

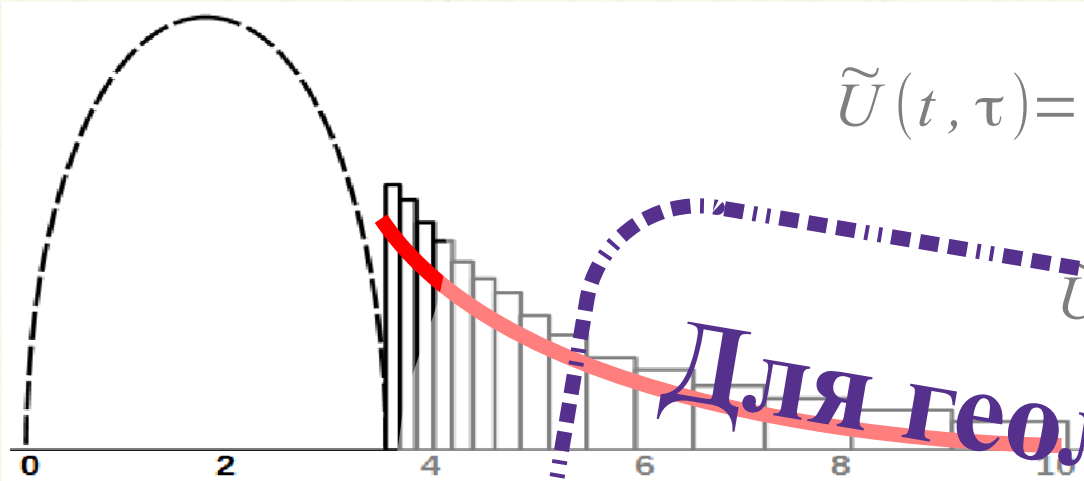
● Частотные системы (когерентное накопление)

$$\check{\tilde{U}}(t, j\omega_i) = \frac{1}{2nT} \int_{t-mT}^{t+mT} f(t) e^{j\omega_i \tau} u(t + \tau) d\tau$$



ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ

- *Временные системы (временное накопление)*



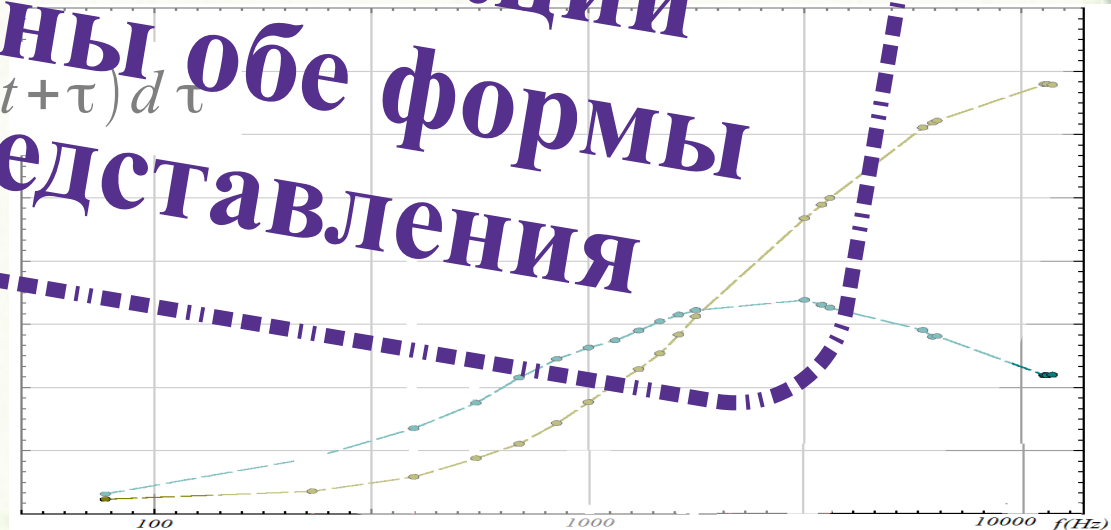
$$\tilde{U}(t, \tau) = \frac{1}{mT} \sum_{i=-m}^{m-1} (f(iT + \tau)u(t + iT + \tau))$$

$$\tilde{U}_i = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \tilde{U}(t, \tau) d\tau; \quad i=1, 2, \dots, r$$

Для геологической интерпретации важны обе формы представления

- *Частотные системы (когерентное накопление)*

$$\check{U}(t, j\omega_i) = \frac{1}{2nT} \int_{t-mT}^{t+mT} f(t) e^{j\omega_i \tau} u(t + \tau) d\tau$$

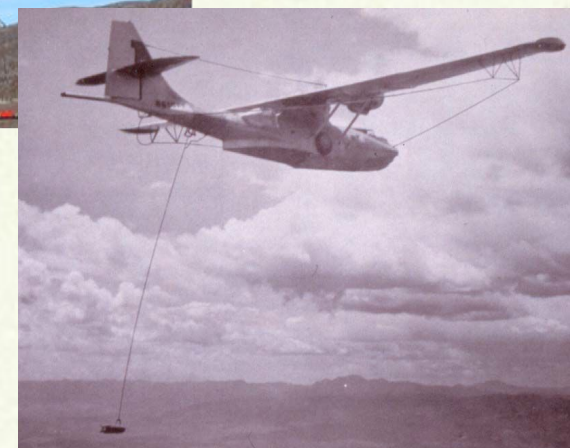


КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ

Частотные

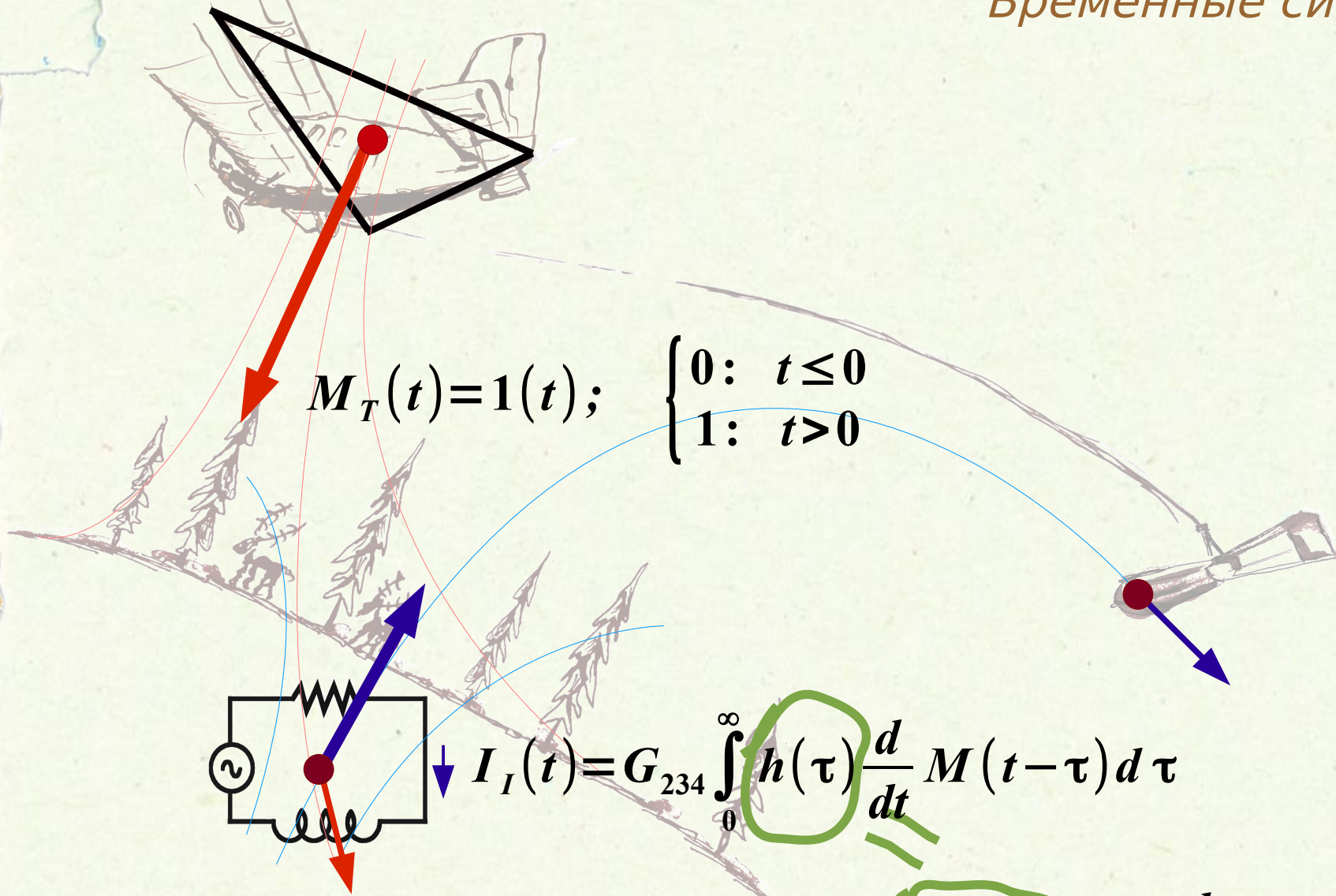


Временные

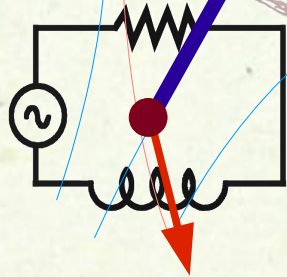


ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Временные системы



$$M_T(t) = 1(t); \quad \begin{cases} 0: & t \leq 0 \\ 1: & t > 0 \end{cases}$$



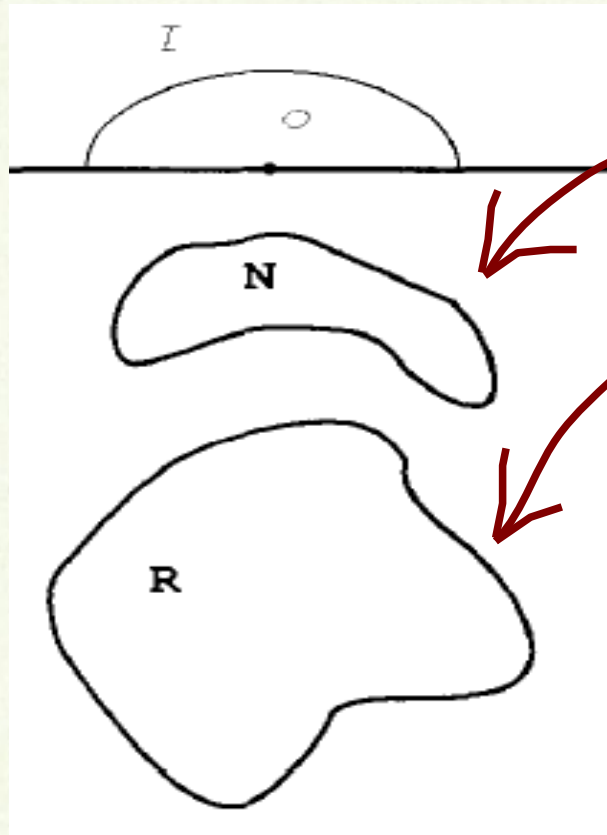
$$I_I(t) = G_{234} \int_0^{\infty} h(\tau) \frac{d}{dt} M(t-\tau) d\tau$$

$$E^R(t) = G_{57} \frac{d}{dt} I_I(t)$$

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Временные системы

$$H(t) = G \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$



Геологическая помеха

Объект поиска

$$r = \frac{H_N(t)}{H_R(t)} = \frac{G_N}{G_R} \exp\left[-\frac{t}{\tau_R} \left(\frac{\tau_R}{\tau_N} - 1\right)\right];$$

$$G_N \gg G_R$$

$$t \rightarrow 0$$

$$r \rightarrow \frac{G_N}{G_R}$$

$$\tau_N \ll \tau_R$$

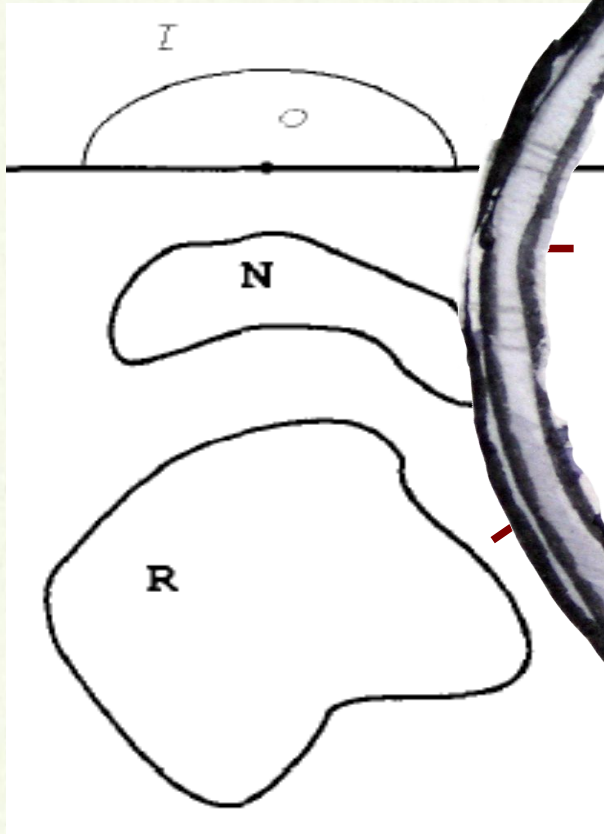
$$t \rightarrow \infty$$

$$r \rightarrow 0$$



ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Временные системы



$$H(t) = G e^{-t/\tau}$$

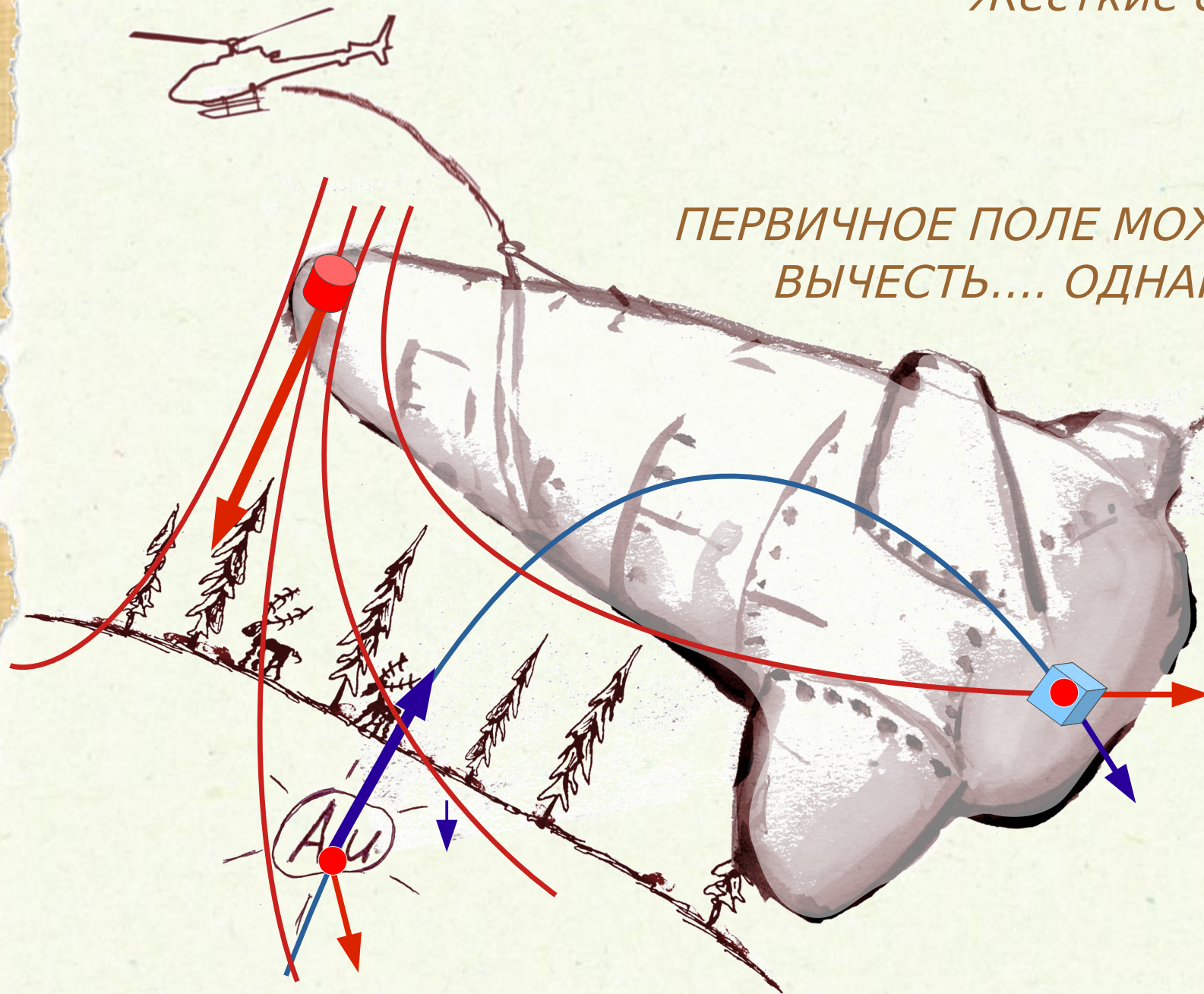
$$H(t) = G \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$

$$u(t) = \frac{d}{dt} H(t) = -\frac{1}{\tau} G e^{-t/\tau}$$

$$R \rightarrow 0: \tau \rightarrow \infty \quad u(t) \rightarrow 0$$

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Жесткие системы

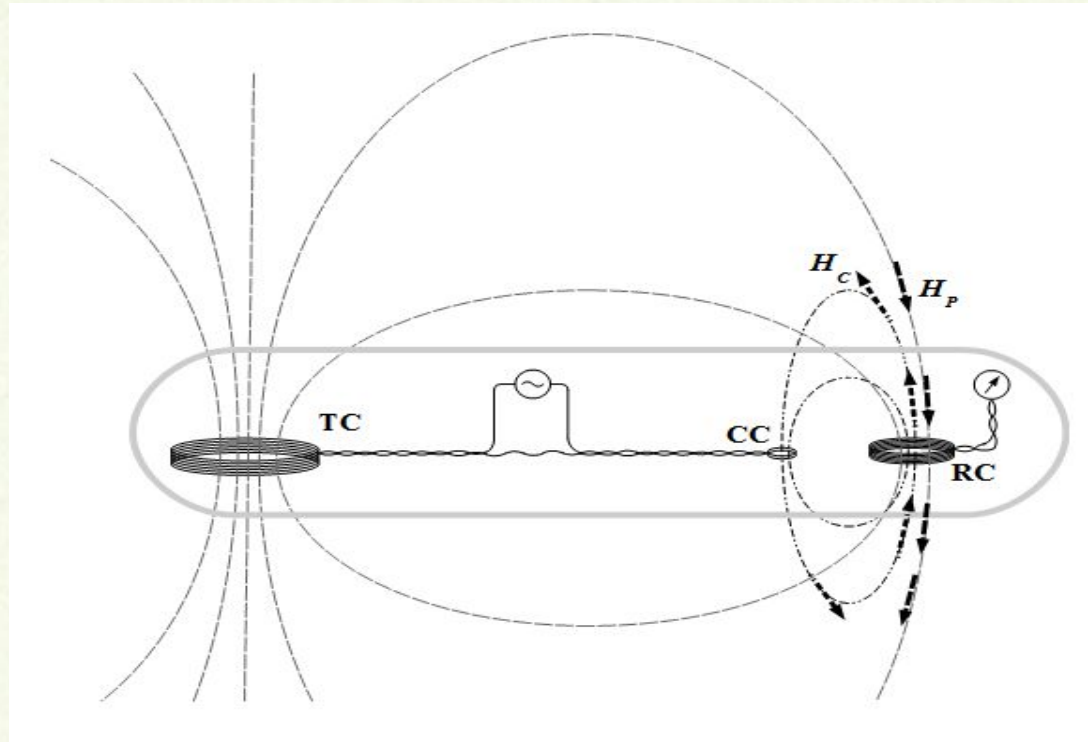


ПЕРВИЧНОЕ ПОЛЕ МОЖНО ПРОСТО
ВЫЧЕСТЬ.... ОДНАКО

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Жесткие системы

ПЕРВИЧНОЕ ПОЛЕ МОЖНО ПРОСТО
ВЫЧЕСТЬ.... ОДНАКО
НЕ УДАЕТСЯ ОБЕСПЕЧИТЬ МЕХАНИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ



$$R = \left(\frac{H_S}{H_P} \right)_{\rho=0} \approx 0,001$$

$$\frac{\Delta H_P}{H_P} = 3 \frac{\Delta d}{d}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta H_P}{H_P} \sim R \\ d = 10 \text{ м} \end{array} \right. \Rightarrow \Delta d \sim 10/3 \cdot 10^{-3} \quad (\sim 3 \text{ мм})$$

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ

Частотные Жесткие



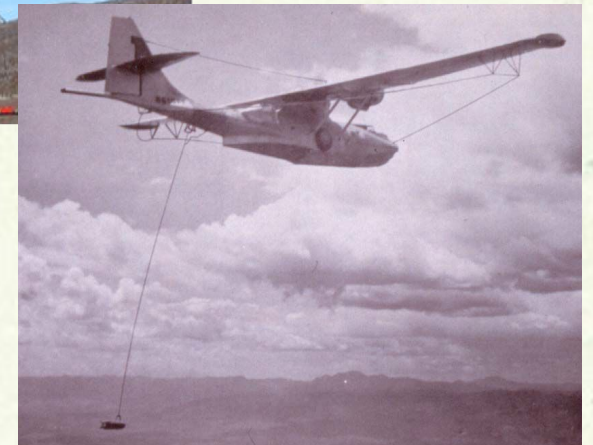
Разнесенные



Временные Жесткие



Разнесенные



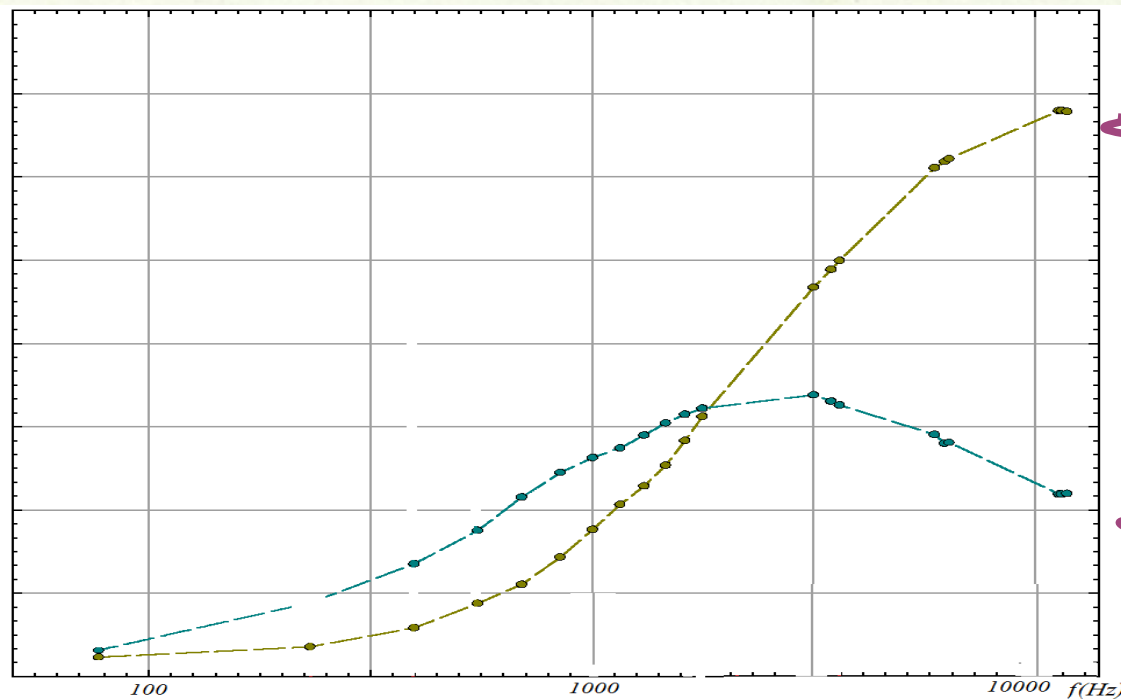
ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Частотные разнесенные системы

Результат измерений – частотный спектр (набор сверток)

$$\check{U}(t, j\omega_i) = \frac{1}{2nT} \int_{t-mT}^{t+mT} f(t) e^{j\omega_i \tau} u(t+\tau) d\tau$$

Вещественная
компонента «испорчена»
первичным полем



Но мнимая может быть
получена непосредственно

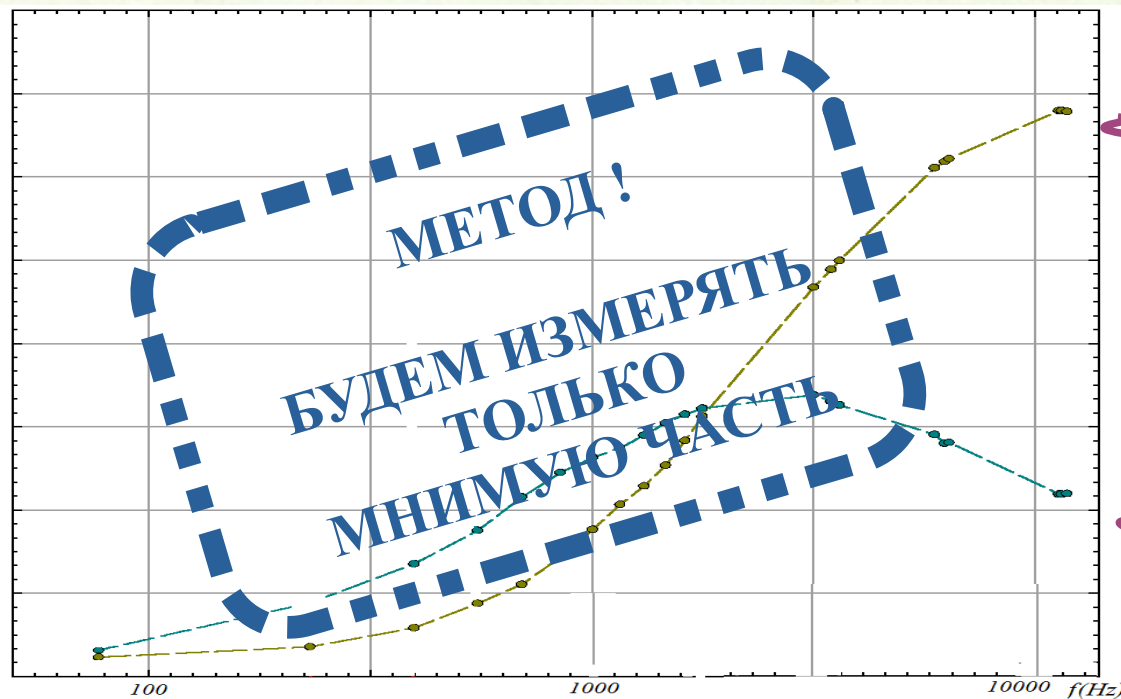
ВЛИЯНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Частотные разнесенные системы

Результат измерений – частотный спектр (набор сверток)

$$\check{U}(t, j\omega_i) = \frac{1}{2nT} \int_{t-mT}^{t+mT} f(t) e^{j\omega_i \tau} u(t+\tau) d\tau$$

Вещественная
компонента «испорчена»
первичным полем



Но мнимая может быть
получена непосредственно

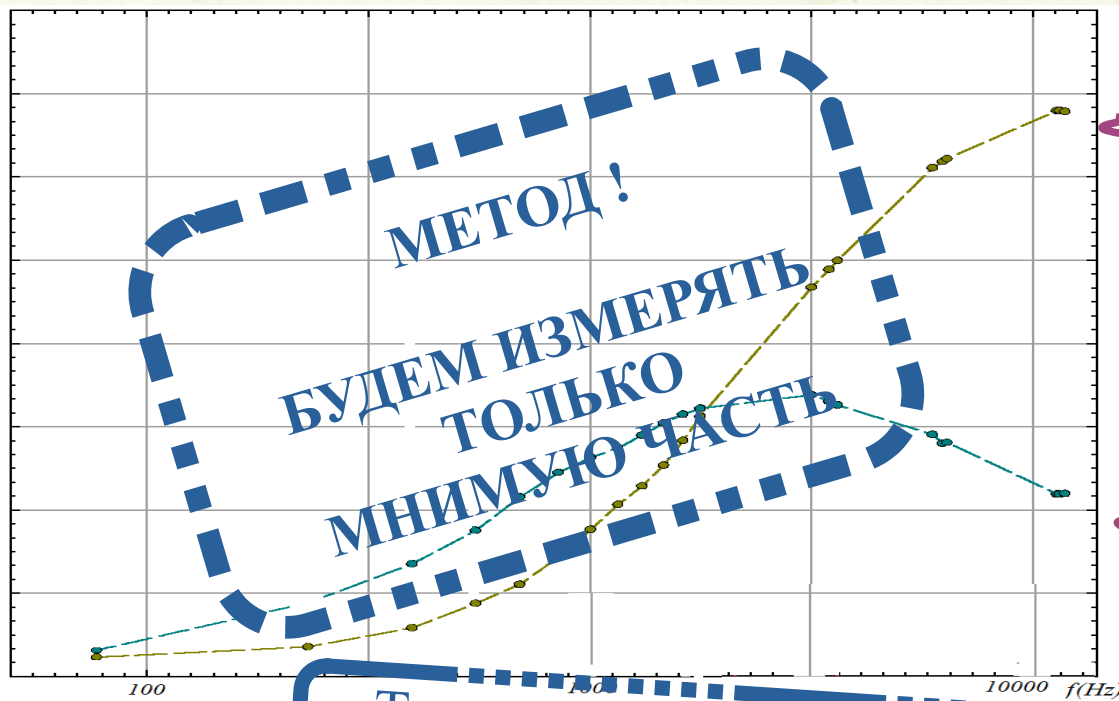
ВЛИЯНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Частотные разнесенные системы

Результат измерений – частотный спектр (набор сверток)

$$\check{U}(t, j\omega_i) = \frac{1}{2nT} \int_{t-mT}^{t+mT} f(t) e^{j\omega_i \tau} u(t+\tau) d\tau$$

Вещественная
компонента «испорчена»
первичным полем



Но мнимая может быть
получена непосредственно

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Стабилизация

СТАБИЛЬНОСТЬ НА АППАРАТНОМ УРОВНЕ

на уровне 10^{-5} - 10^{-6}

НЕВОЗМОЖНА !!!!

**ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ
НЕОБХОДИМА КОРРЕКЦИЯ**

ПРЕДЛОЖЕН МЕТОД

- **Выполнить мониторинг параметров измерительного преобразования**
- **Ввести соответствующие поправки**

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Стабилизация

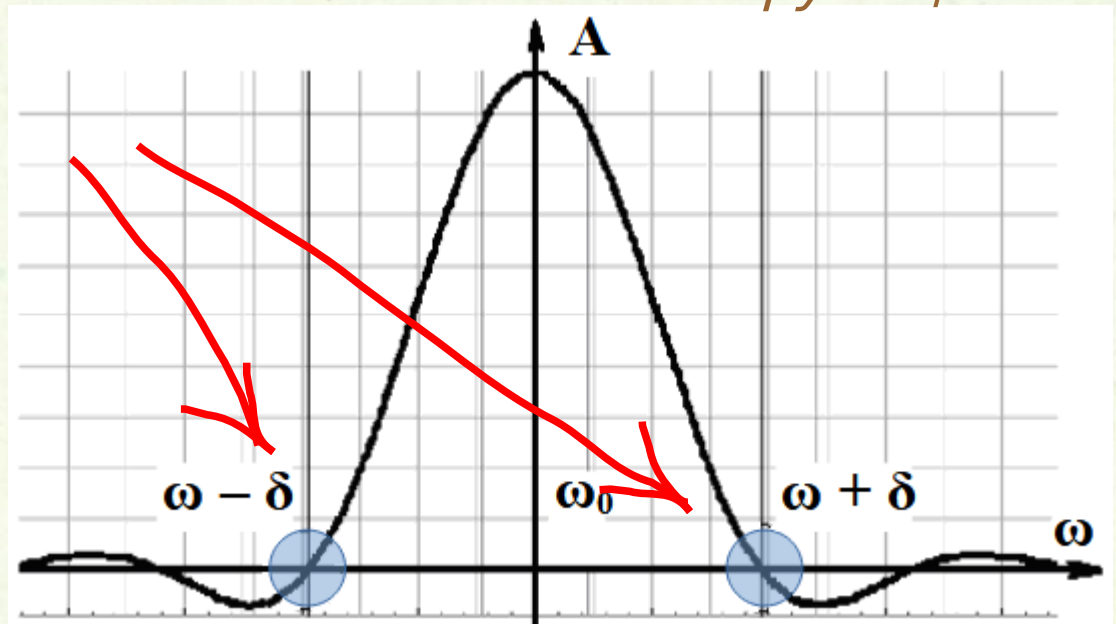
Когерентное накопление частотно СЕЛЕКТИВНО

$$\check{U}(t, j\omega) = \frac{1}{2nT} \int_{t-nT}^{t+nT} f(\tau) e^{j\omega\tau} u(t+\tau) d\tau$$

чувствительность
детектирования

к «посторонним» частотам определяется формой весовой функции

Эти частоты «невидимы»

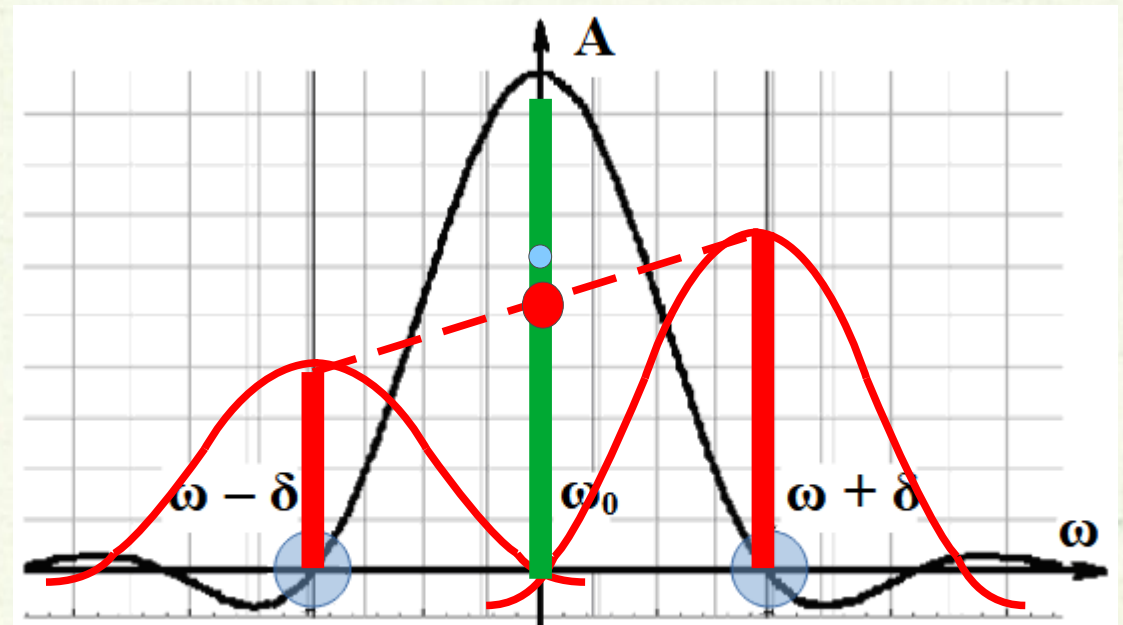


ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Стабилизация

Подадим на вход дополнительный эталонный процесс

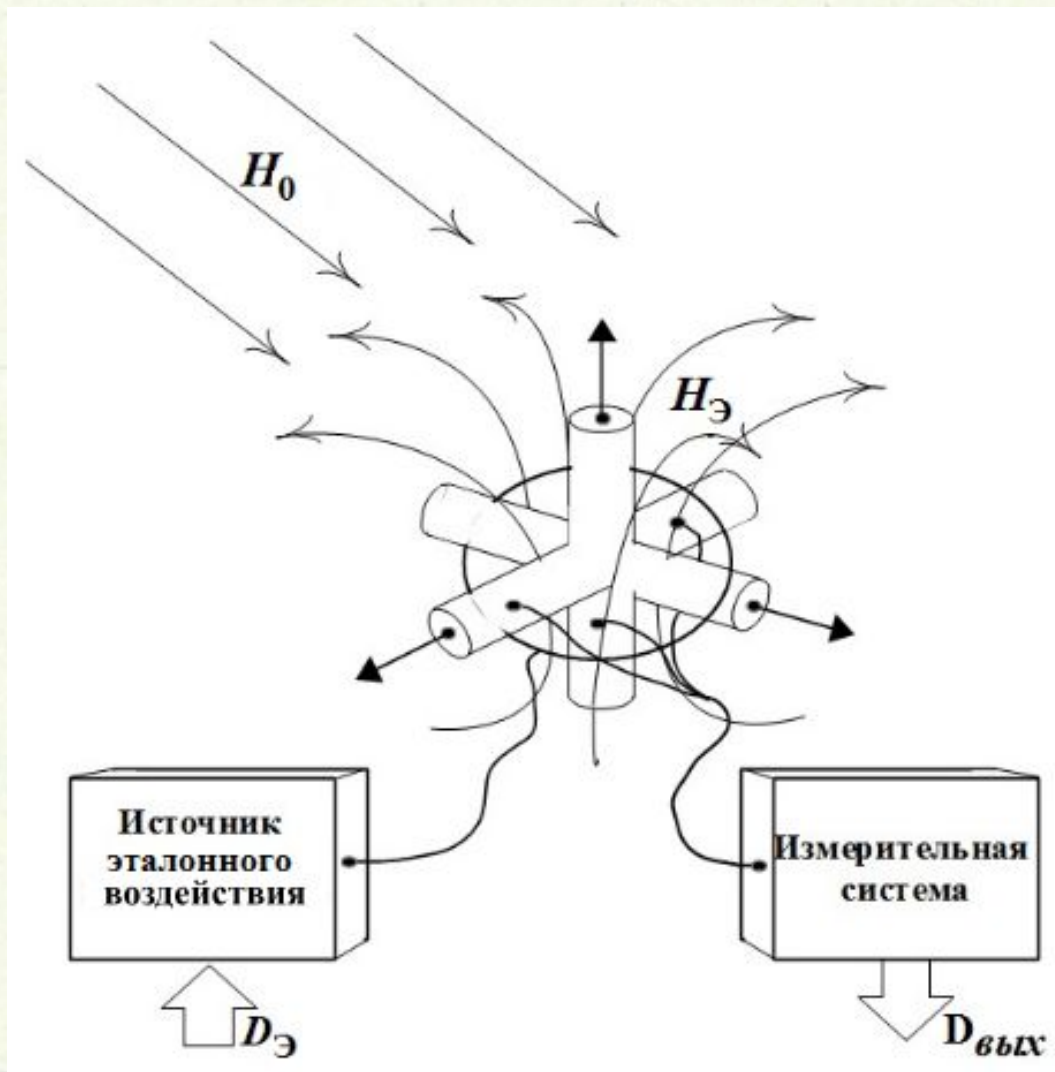
Вместе с основным исследуемым процессом получится триплет



ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Стабилизация

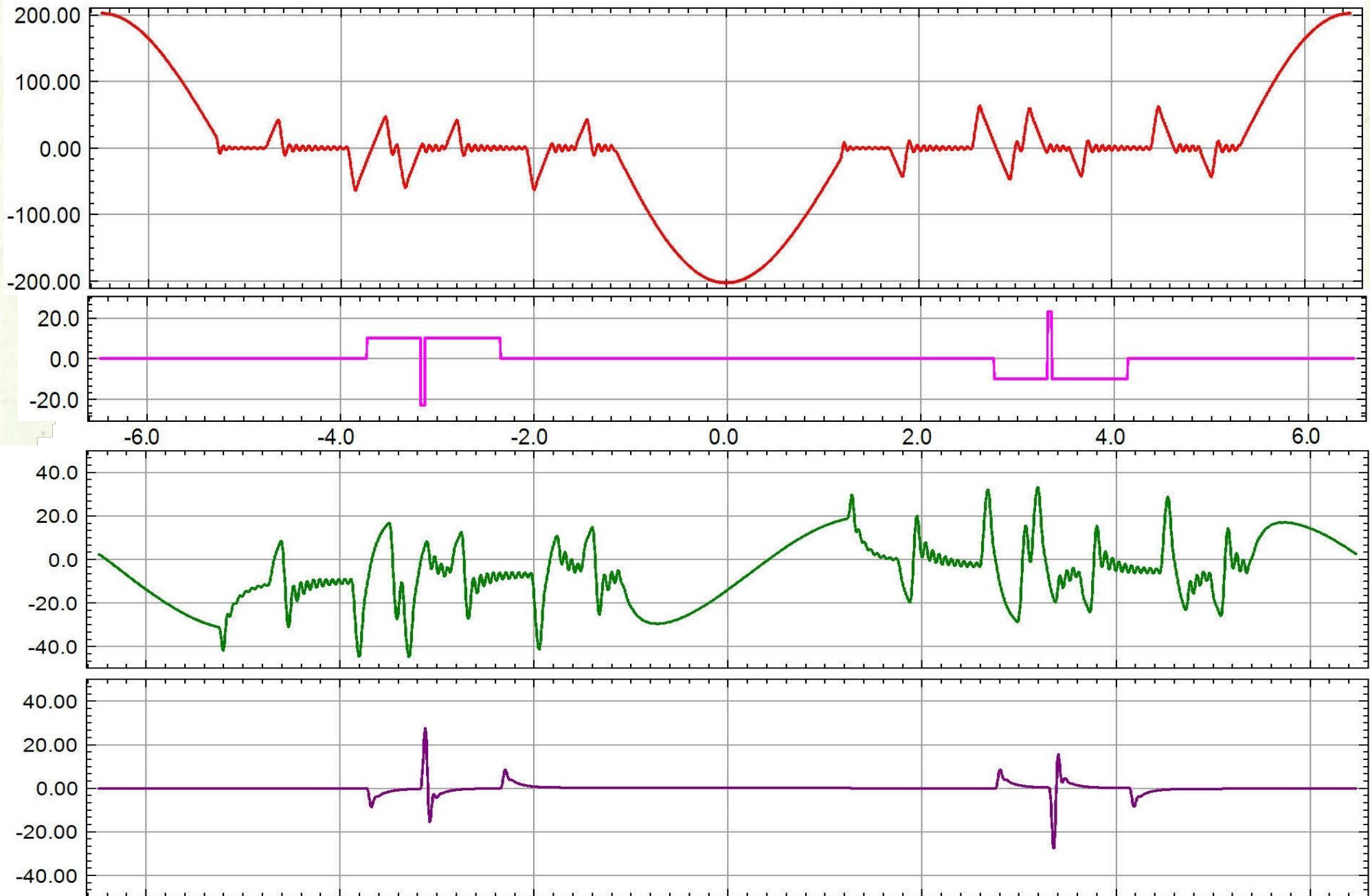
Коррекция при измерении сигнала
приемных рамок



Стабилизация измерительных характеристик

(Адаптивная коррекция)

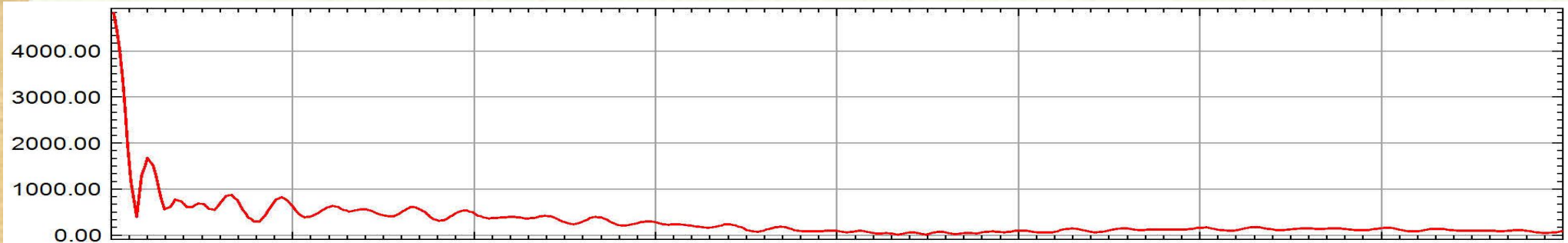
Разделение процессов



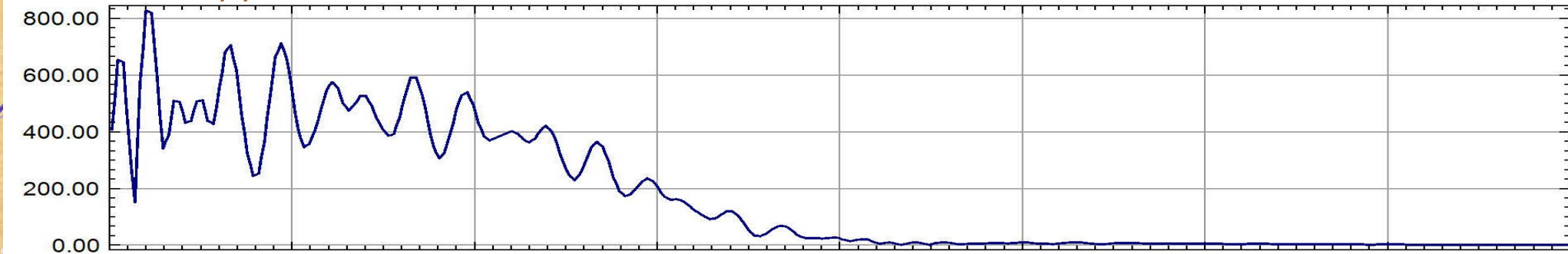
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Стабилизация

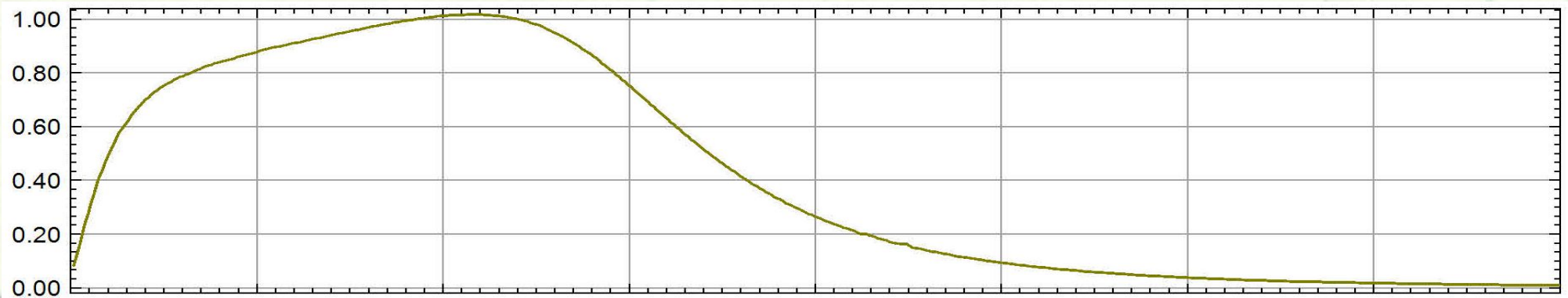
Вход



Выход

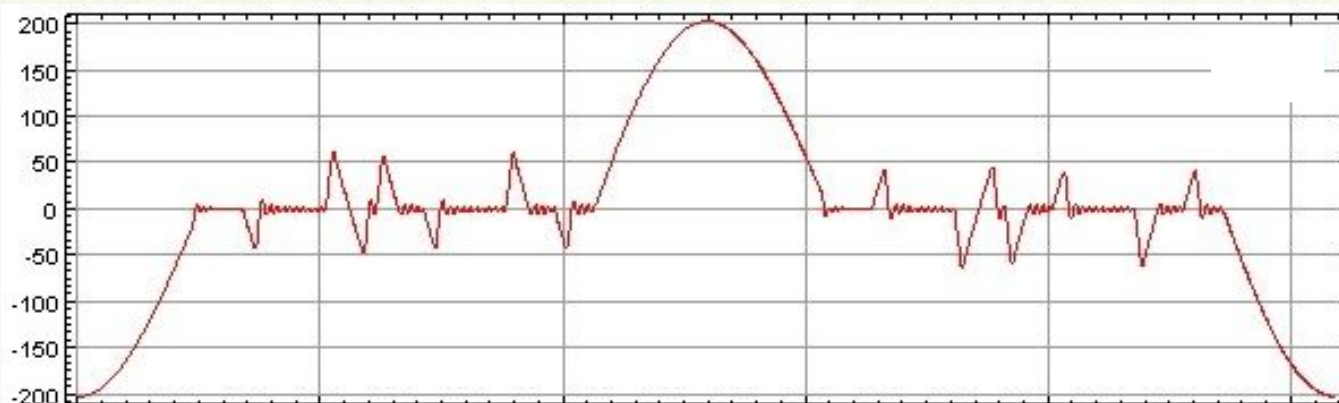


АЧХ

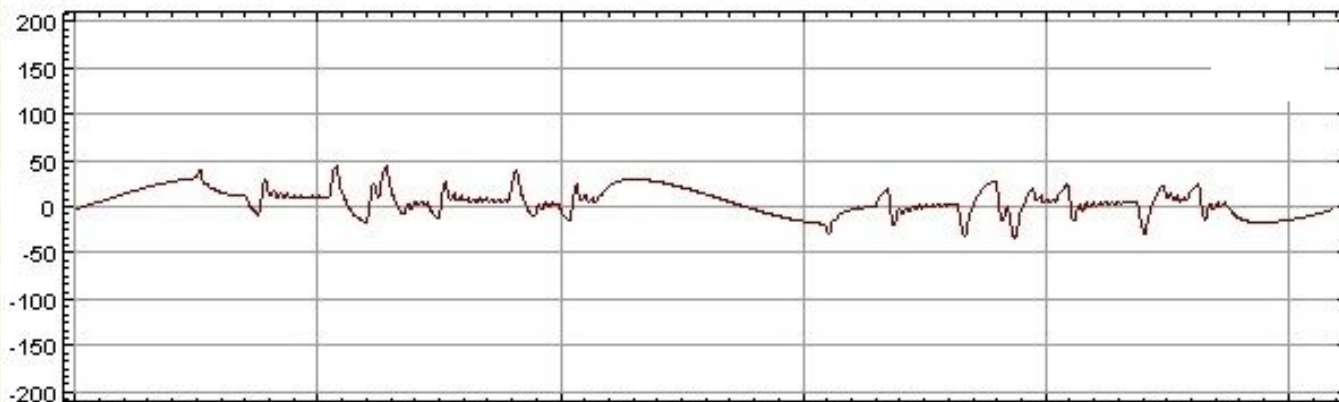


Стабилизация измерительных характеристик (Адаптивная коррекция)

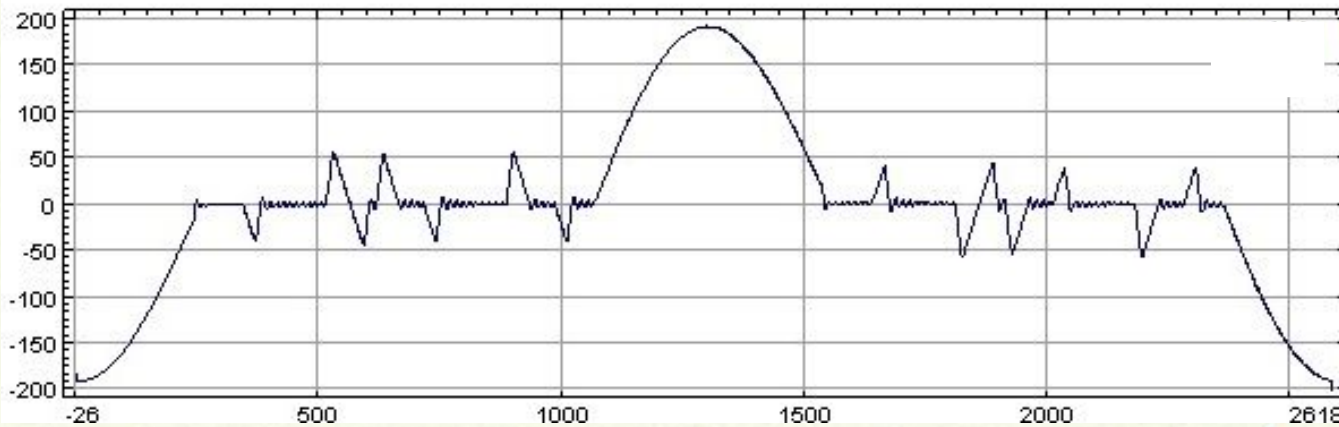
Вход



Выход



*Результат
коррекции*



ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
Контроль геометрии

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
Контроль геометрии

НАИБОЛЕЕ СЛОЖЕН
Для разнесенных систем

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Контроль геометрии

Базовые соотношения

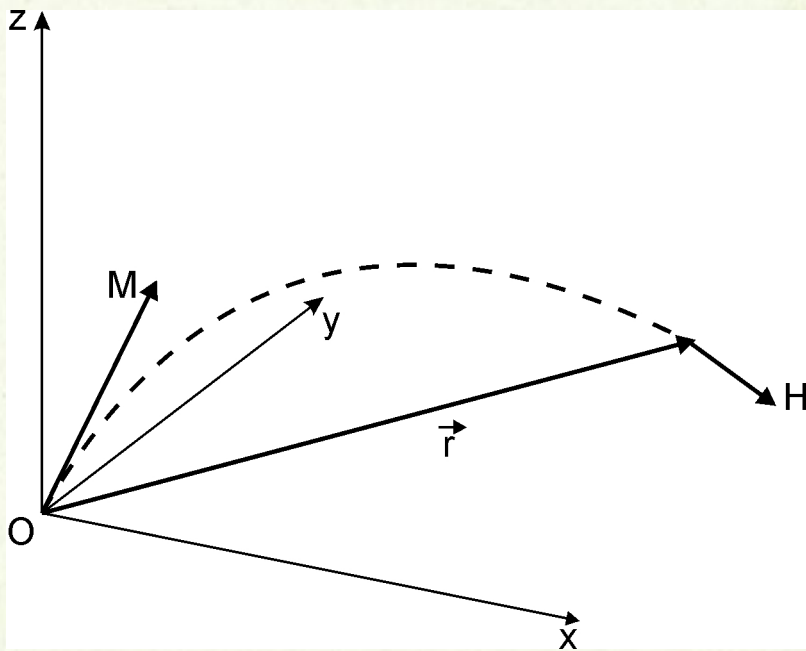
Поле точечного диполя

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}|^5} [[\mathbf{M} \times \mathbf{r}] \times \mathbf{r}] + 2(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}|^3} (3\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T - \mathbf{I}) \mathbf{M} = \mathbf{\Omega}(\mathbf{r}) \mathbf{M}$$

$$\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}; \quad \mathbf{e}_R^T \mathbf{e}_R = (\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_R) = 1;$$

$$\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T = \begin{pmatrix} e_x e_x & e_x e_y & e_x e_z \\ e_y e_x & e_y e_y & e_y e_z \\ e_z e_x & e_z e_y & e_z e_z \end{pmatrix}$$

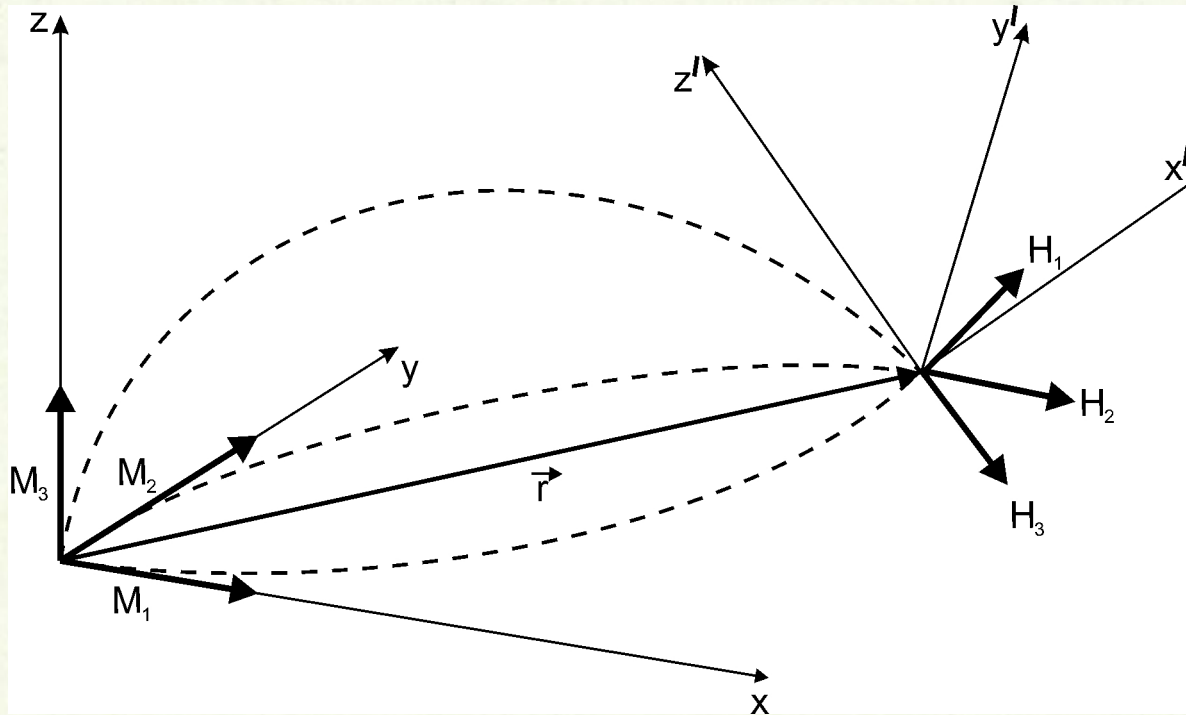


$$\mathbf{M} = \mathbf{\Theta}(\mathbf{r}) \mathbf{H},$$

$$\mathbf{\Theta}(\mathbf{r}) = [\mathbf{\Omega}(\mathbf{r})]^{-1} = 2\pi|\mathbf{r}|^3 (3\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T - 2\mathbf{I})$$

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Контроль геометрии

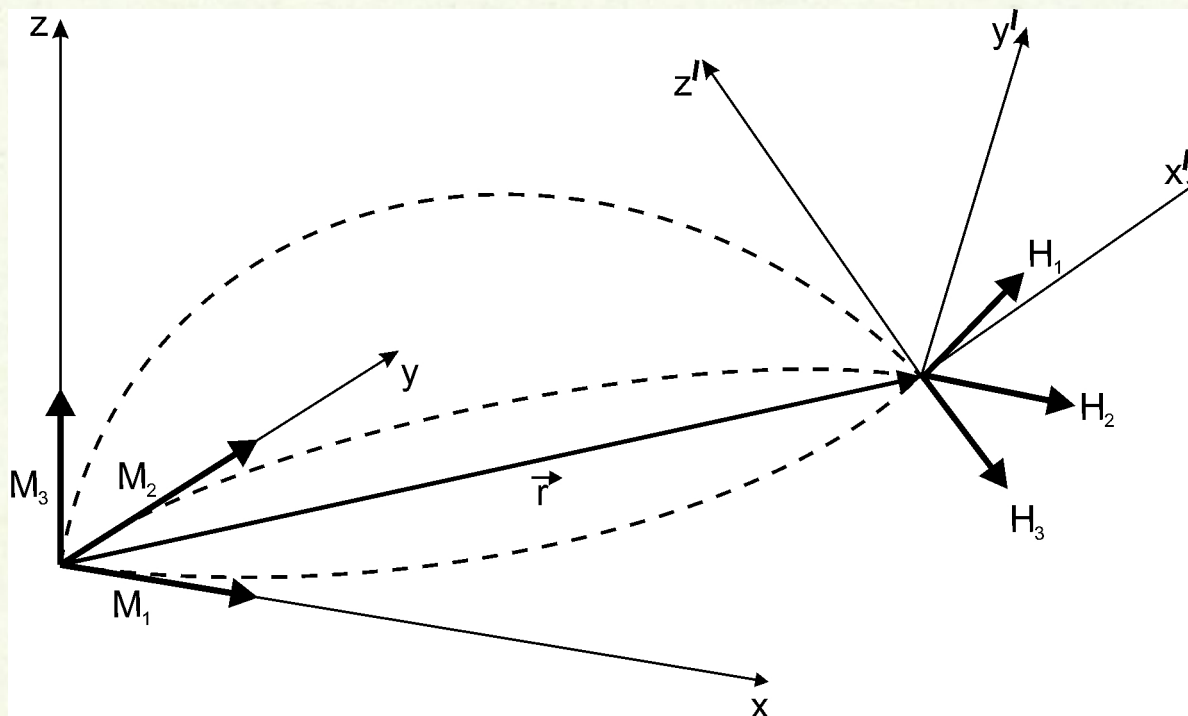


$$\mathbf{M}_i = \mathbf{R} \Theta(\mathbf{r}) \mathbf{H}_i, \quad i=1,2,3$$

$$\mathbf{M}_i^T \mathbf{M}_j = (\mathbf{H}_i^T \Theta^T(\mathbf{r}) \mathbf{R}^T) (\mathbf{R} \Theta(\mathbf{r}) \mathbf{H}_j) = \mathbf{H}_i^T (\Theta(\mathbf{r}))^2 \mathbf{H}_j;$$
$$i, j=1,2,3; j \geq i$$

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Контроль геометрии



$$\mathbf{M}_i = \mathbf{R} \Theta(\mathbf{r}) \mathbf{H}_i, \quad i=1,2,3$$

$$\mathbf{M}_i^T \mathbf{M}_j = (\mathbf{H}_i^T \Theta^T(\mathbf{r}) \cancel{\mathbf{R}^T}) (\cancel{\mathbf{R}} \Theta(\mathbf{r}) \mathbf{H}_j) = \mathbf{H}_i^T (\Theta(\mathbf{r}))^2 \mathbf{H}_j;$$

$i, j=1,2,3; j \geq i$

Матрица \mathbf{R} исключена!

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Контроль геометрии

$$\begin{aligned} & 3e_x e_x (H_{ix} H_{jx}) + 3e_x e_y (H_{ix} H_{jy} + H_{jx} H_{iy}) + 3e_x e_z (H_{ix} H_{jz} + H_{jx} H_{iz}) + \\ & \quad + 3e_y e_y (H_{iy} H_{jy}) \quad + 3e_y e_z (H_{iy} H_{jz} + H_{jy} H_{iz}) + \\ & \quad + 3e_z e_z (H_{iz} H_{jz}) + \\ & \quad + \frac{(\mathbf{M}_i^T \mathbf{M}_j)}{4\pi^2 |\mathbf{r}|^6} = \\ & = 4(H_{ix} H_{jx} + H_{iy} H_{jy} + H_{iz} H_{jz}); \\ & \quad i, j = 1, 2, 3; j \geq i \end{aligned}$$

$$e_x e_x + e_y e_y + e_z e_z = 1$$

Система нелинейна и избыточна, однако....

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Контроль геометрии

...после замены переменных вида:

$$v_1 = e_x e_x,$$

$$v_2 = e_x e_y,$$

$$v_3 = e_x e_z,$$

$$v_4 = e_y e_y,$$

$$v_5 = e_y e_z,$$

$$v_6 = e_z e_z,$$

$$v_7 = \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}|^6}$$

*превращается в
линейную и имеет
однозначное решение.*

*Ему соответствуют две симметричных точки
возможного положения приемника*

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Контроль геометрии

...после замены переменных вида:

$$v_1 = e_x e_x,$$

$$v_2 = e_x e_y,$$

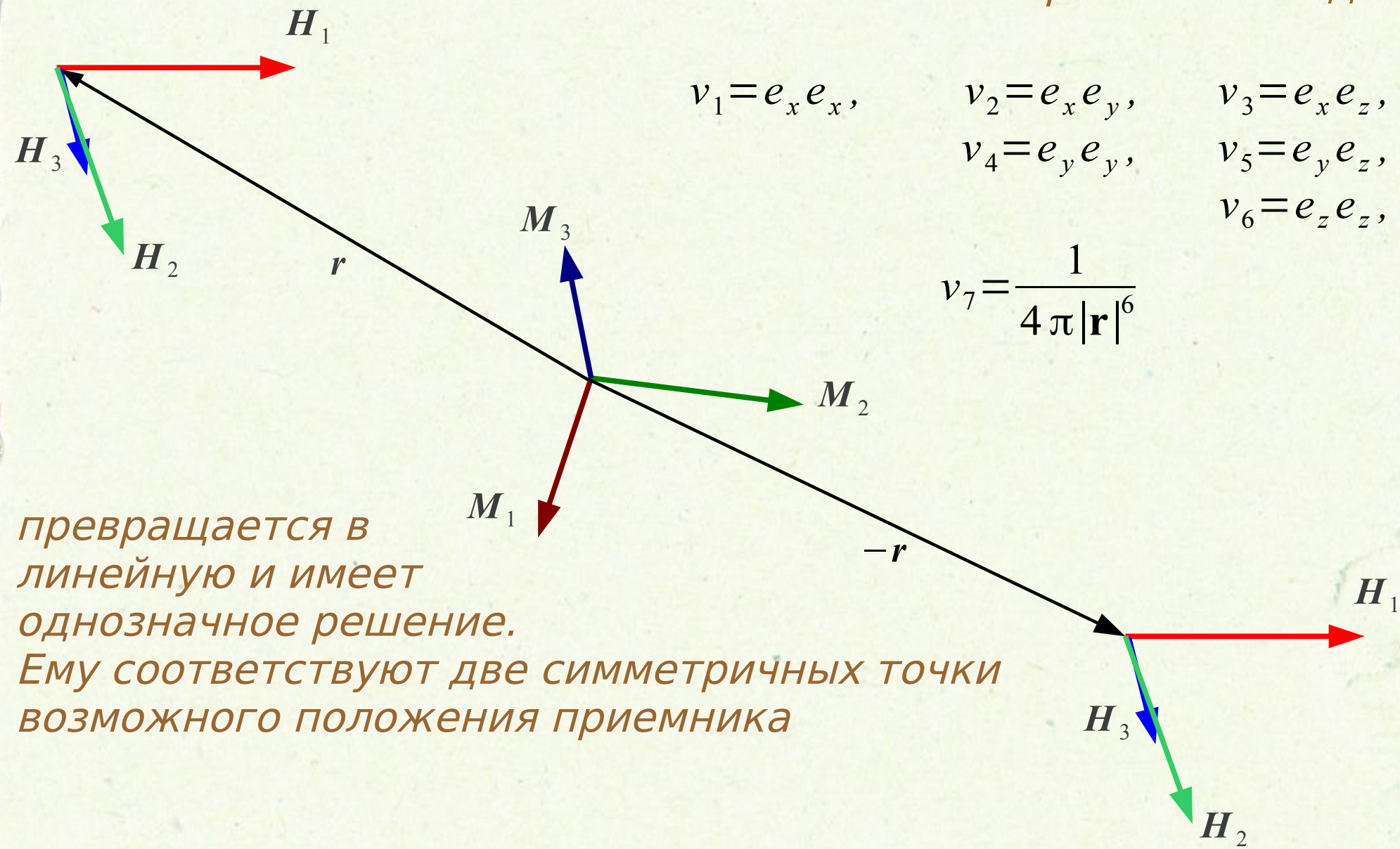
$$v_3 = e_x e_z,$$

$$v_4 = e_y e_y,$$

$$v_5 = e_y e_z,$$

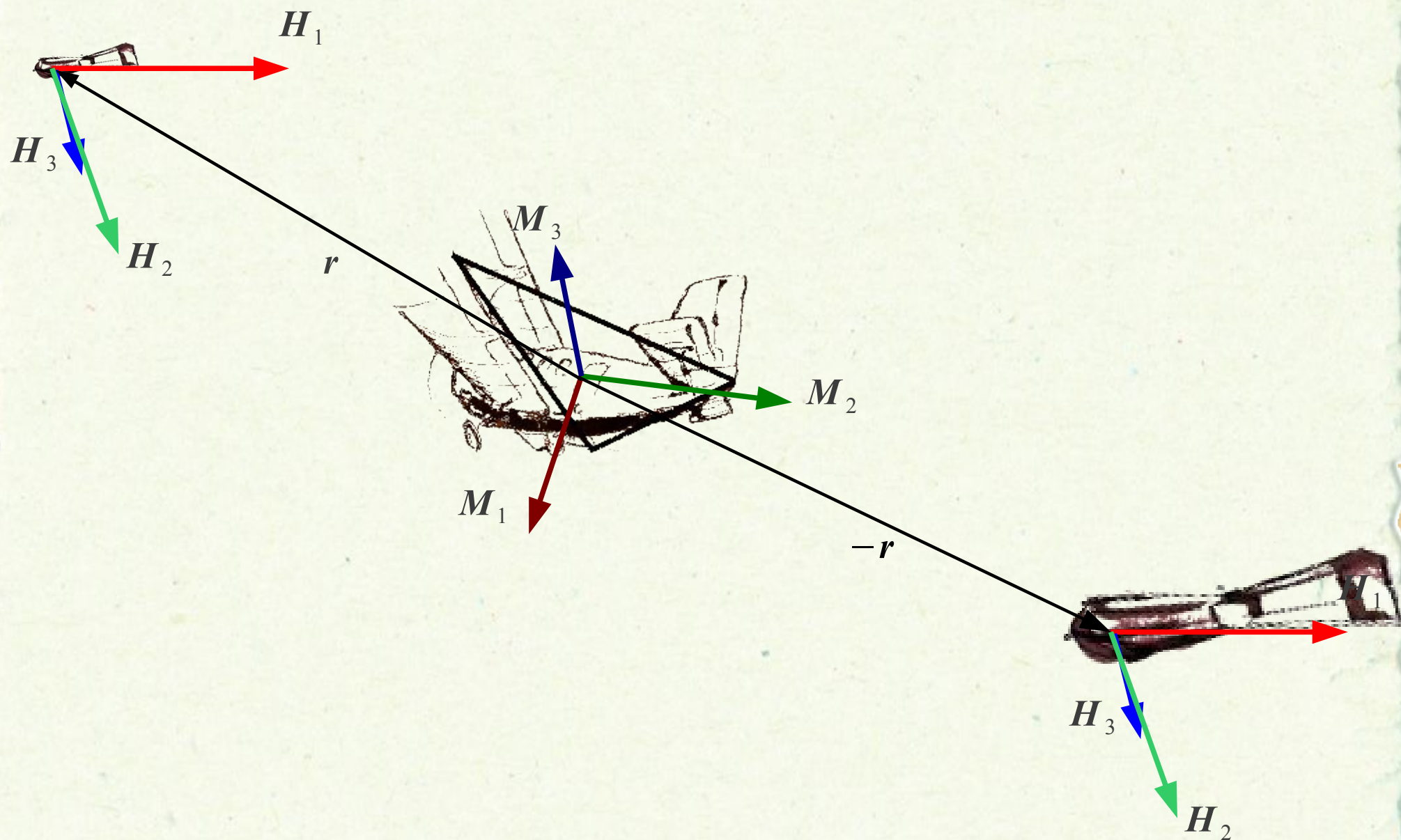
$$v_6 = e_z e_z,$$

$$v_7 = \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}|^6}$$

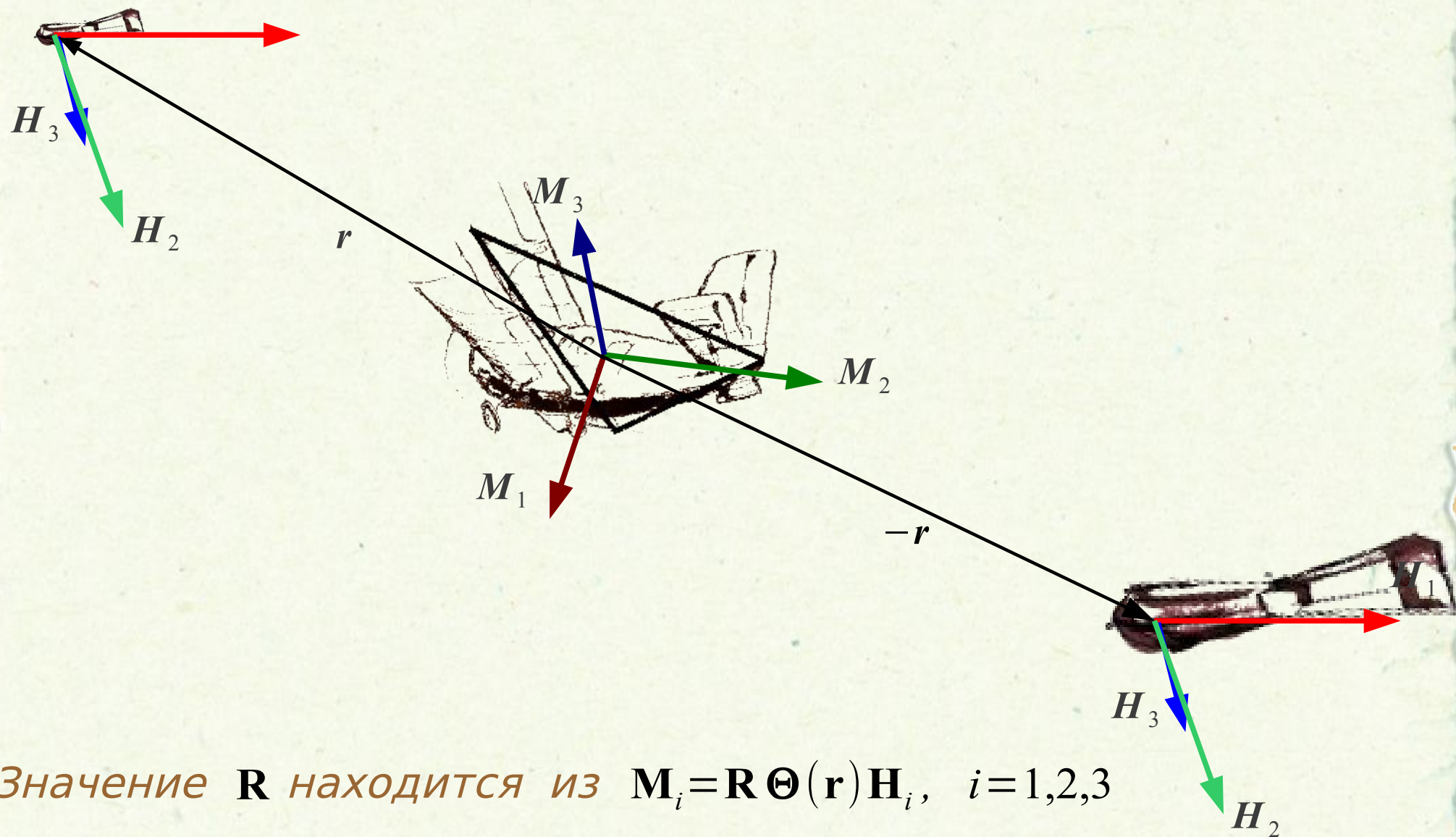


превращается в линейную и имеет однозначное решение. Ему соответствуют две симметричных точки возможного положения приемника

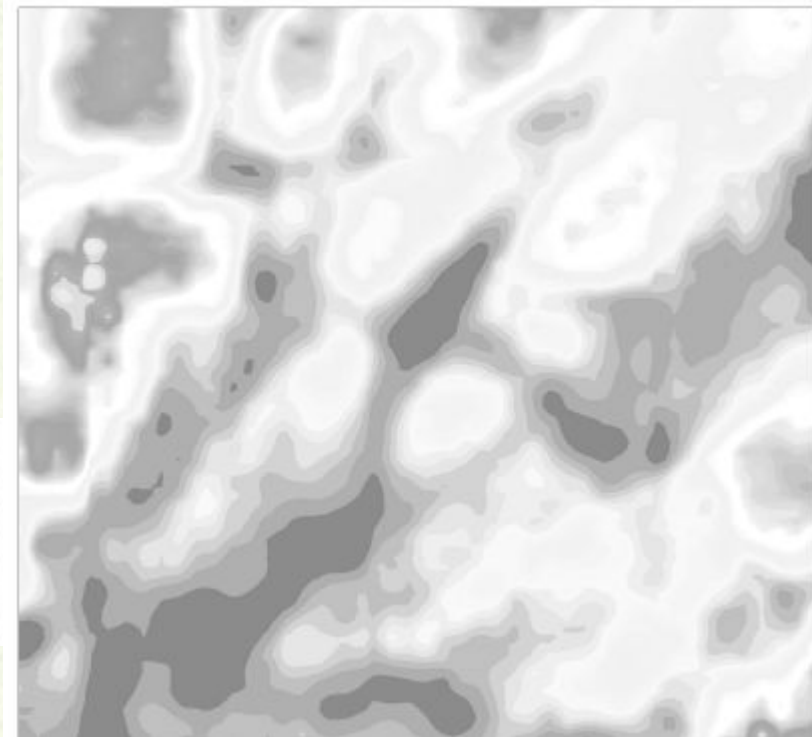
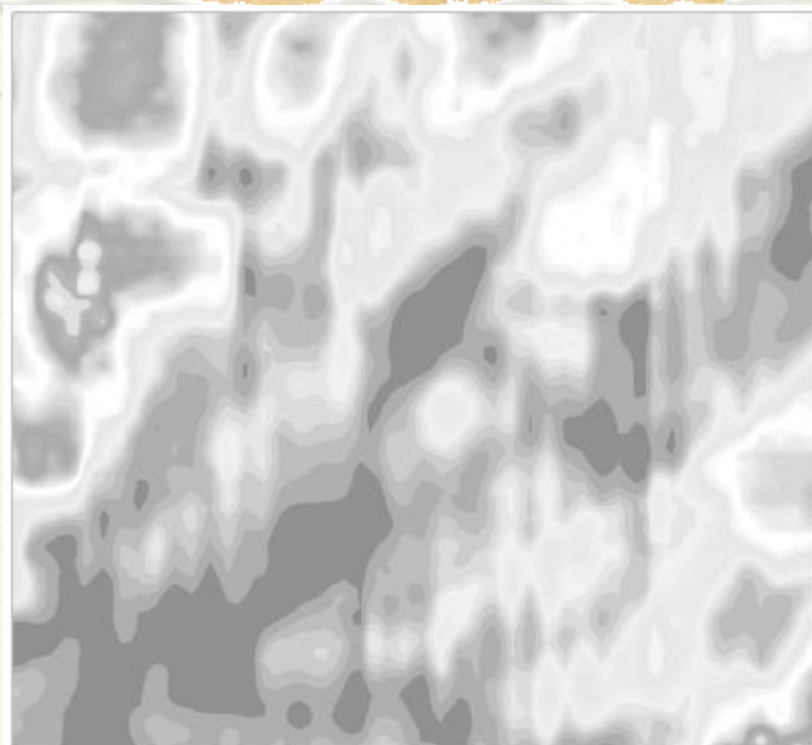
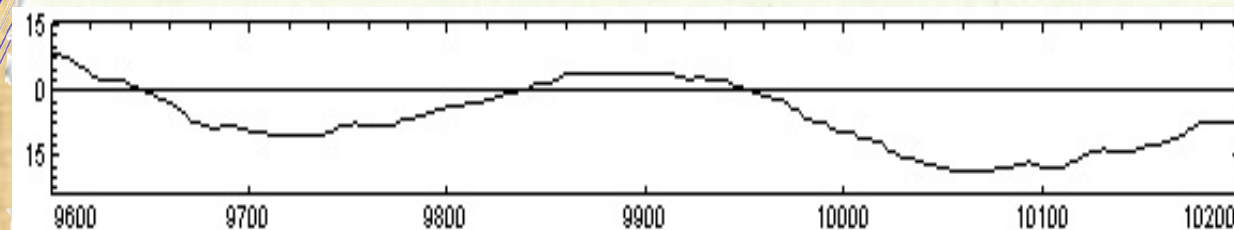
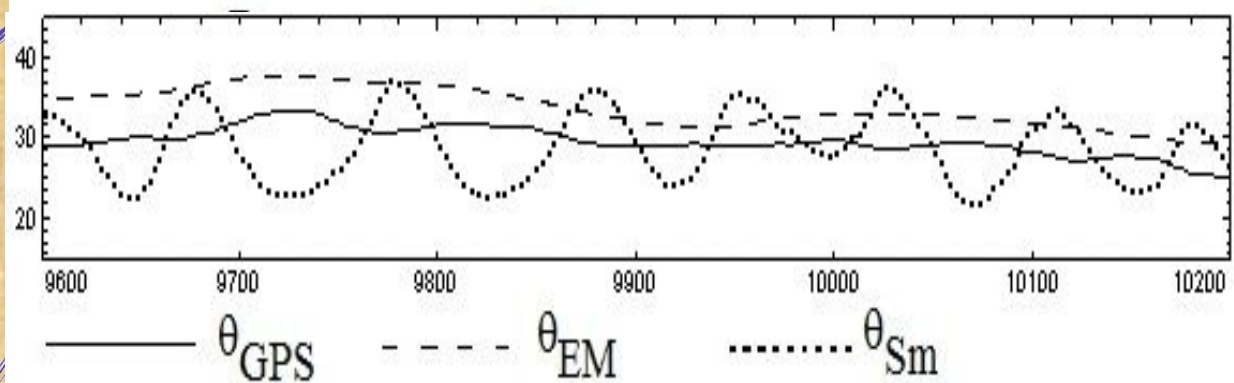
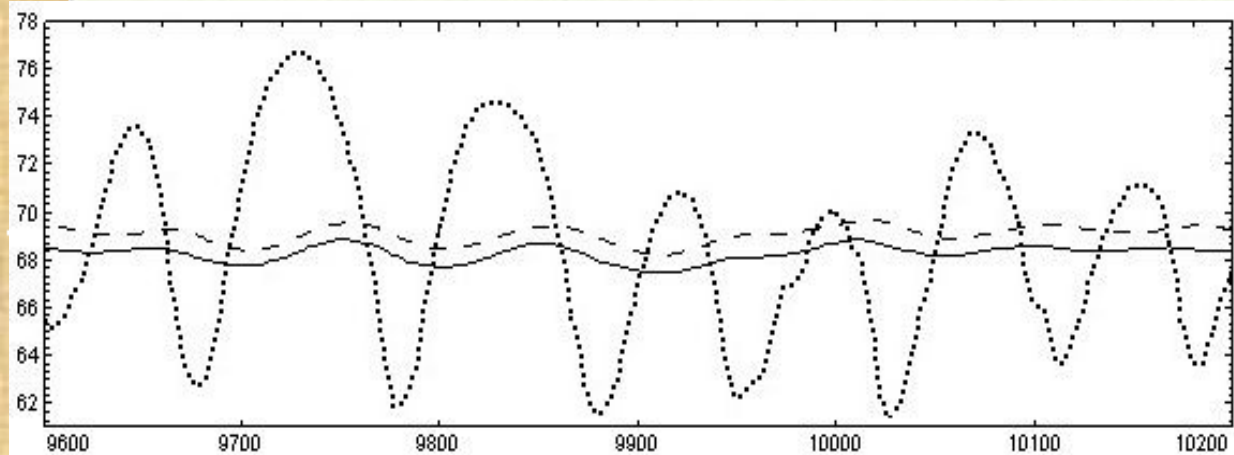
3.4 Метод и алгоритм контроля геометрических параметров зондирующей системы (относительное позиционирование)



ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ Контроль геометрии



ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ Контроль геометрии



ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Выделение поля отклика

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Выделение поля отклика

НАИБОЛЕЕ СЛОЖЕН
Для разнесенных систем

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Выделение поля отклика

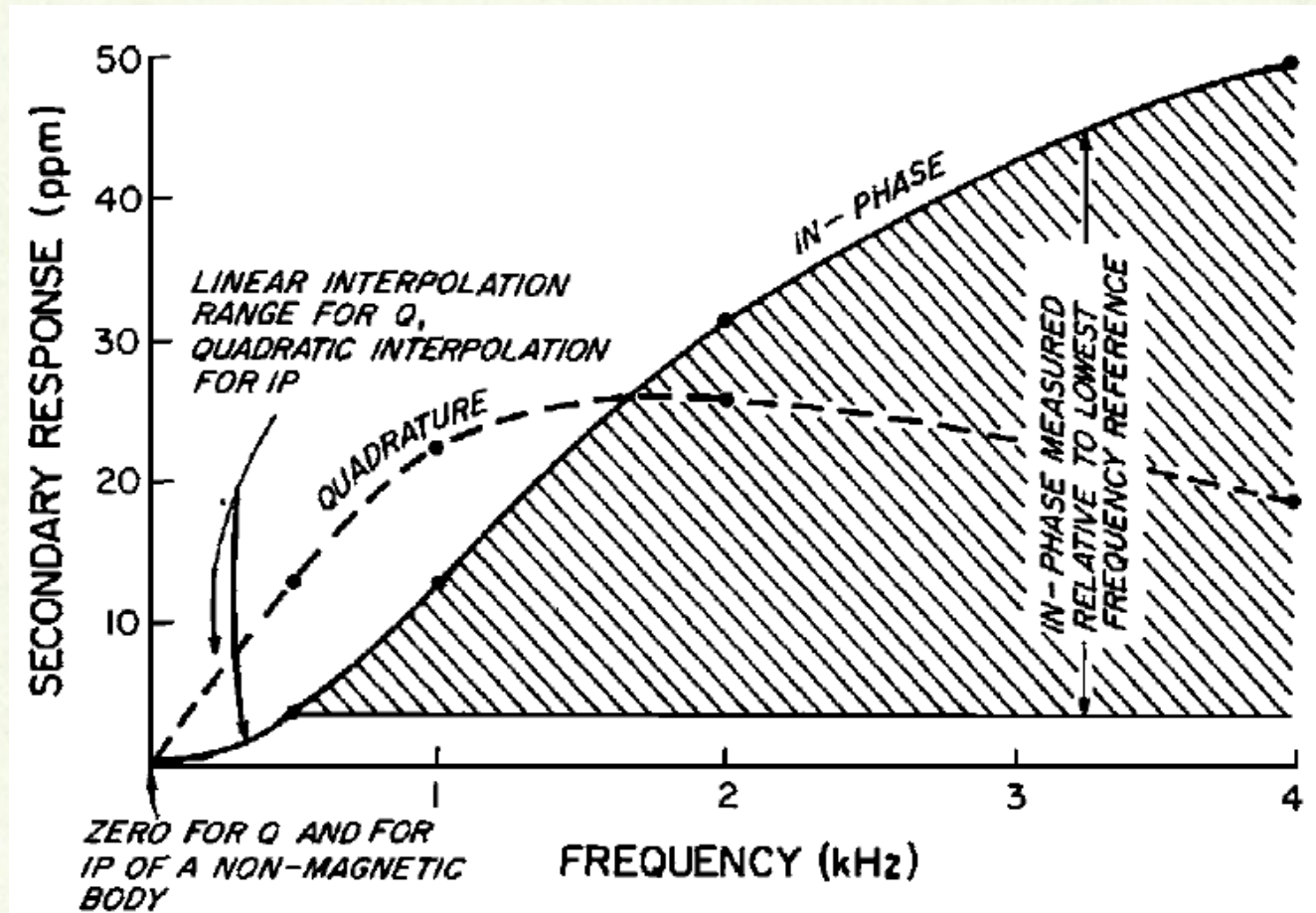
НАИБОЛЕЕ СЛОЖЕН
Для разнесенных систем

Никакие средства позиционирования не обеспечивают точности, достаточной для исключения первичного поля !

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Выделение поля отклика

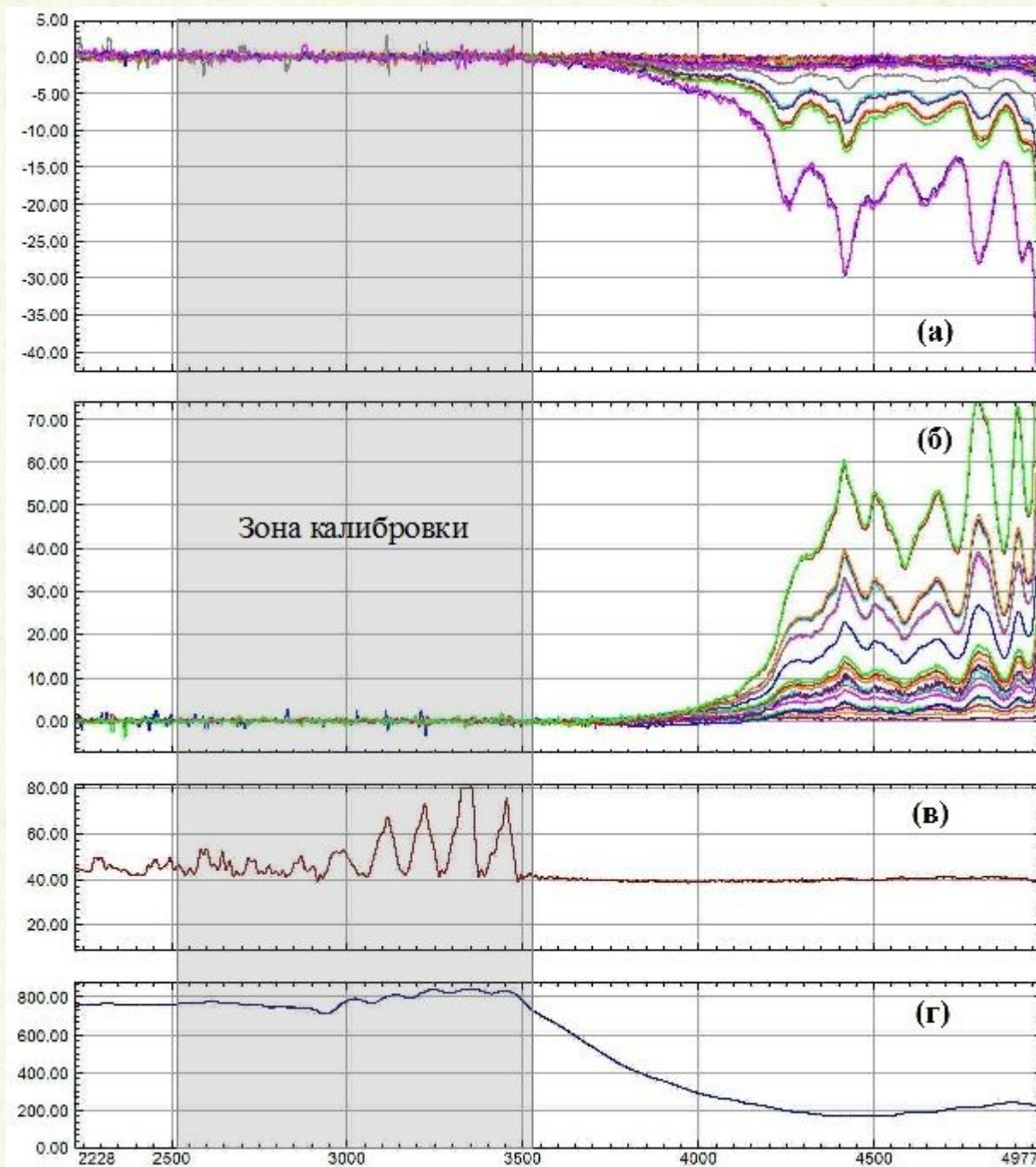
Дополнение
квадратурного
представления



$$\operatorname{Re}\left(\tilde{\mathbf{H}}_s(j\omega_0)\right) \approx \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2 - \omega_0^2} \left[\operatorname{Re}\left(\check{\mathbf{H}}_\Sigma(j\omega_1)\right) - \operatorname{Re}\left(\check{\mathbf{H}}_\Sigma(j\omega_0)\right) \right]$$

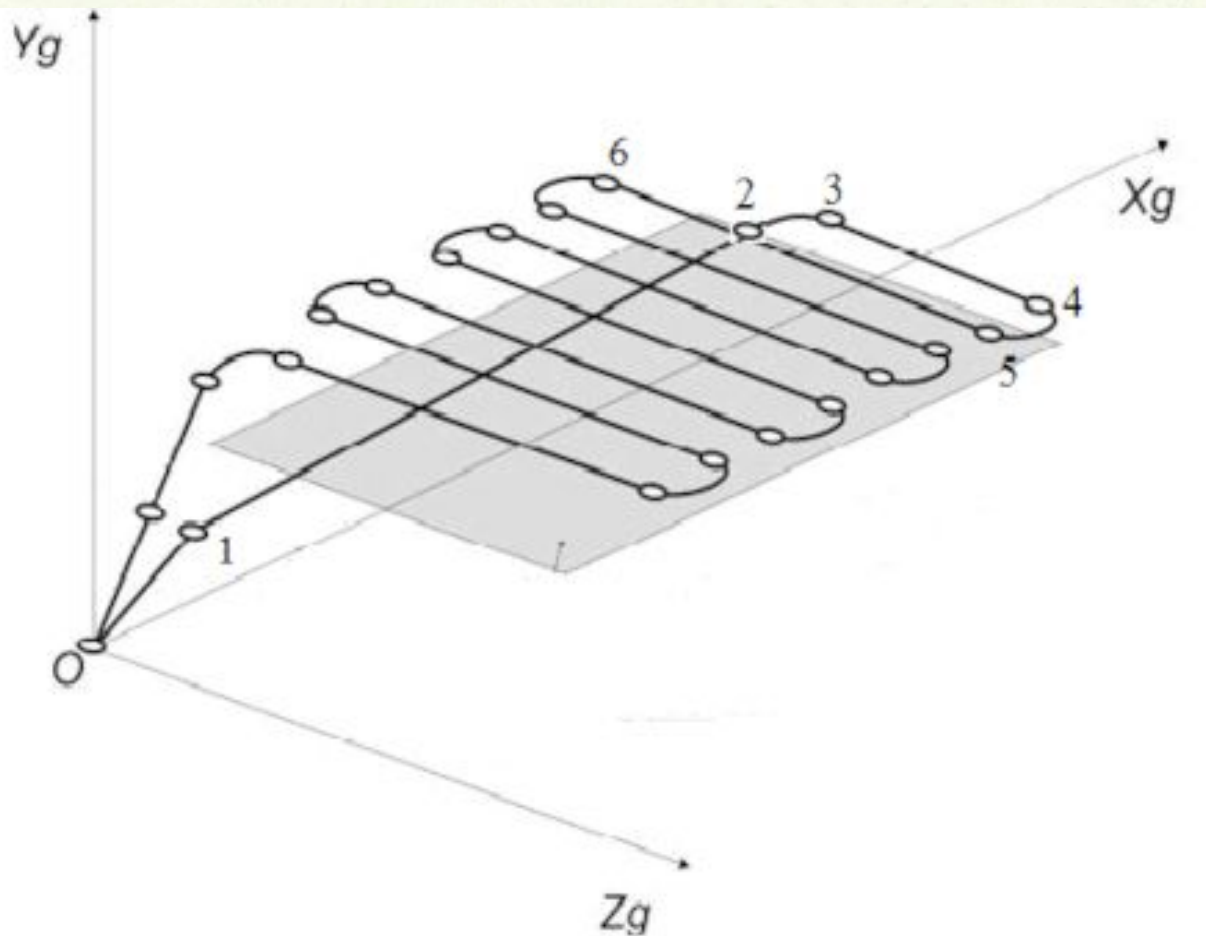
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Выделение поля отклика



ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

3. Обеспечение технологичности работ

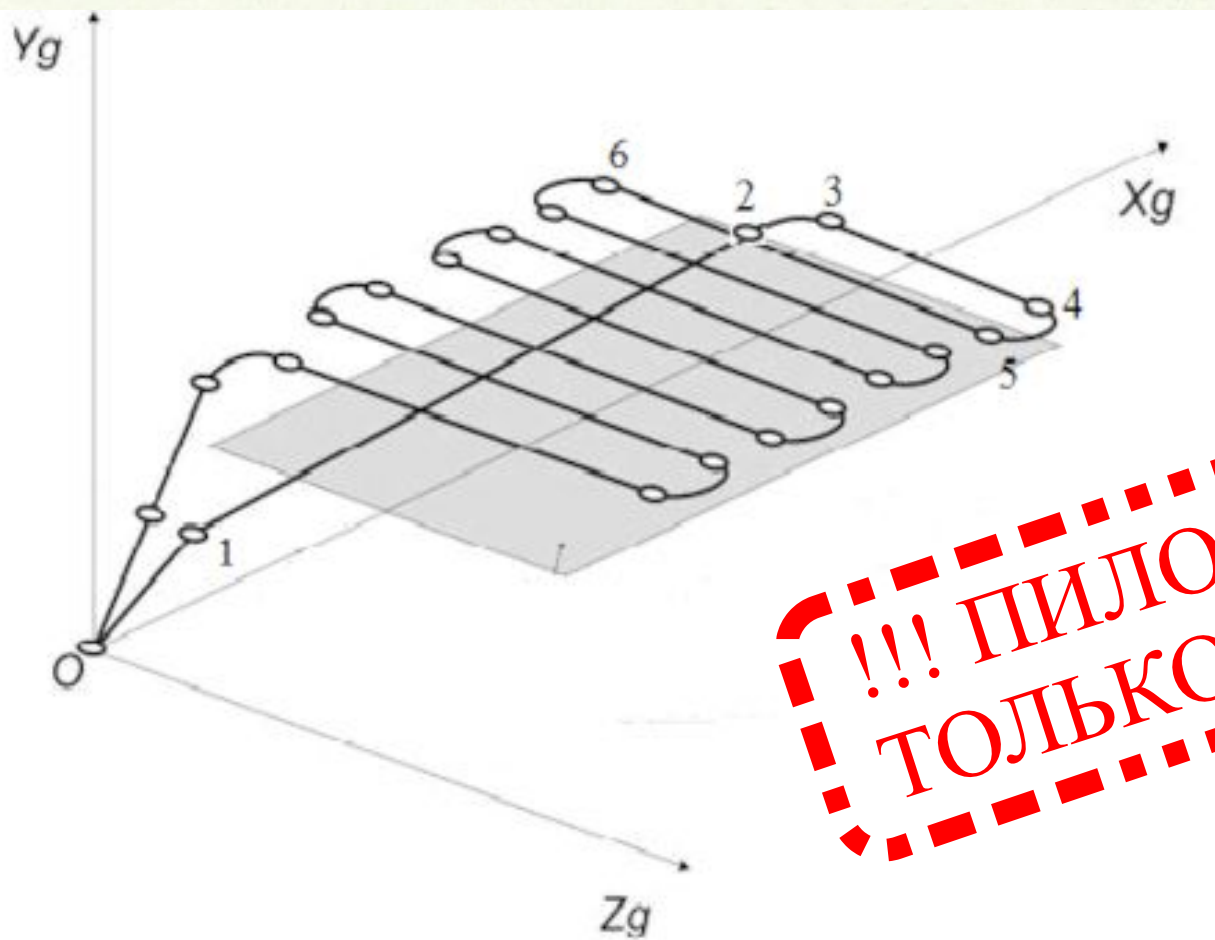


Режимы:

- *Заход на маршрут*
- *Стабилизация на линии пути*

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

3. Обеспечение технологичности работ



Режимы:

- Заход на маршрут
- Стабилизация на линии пути

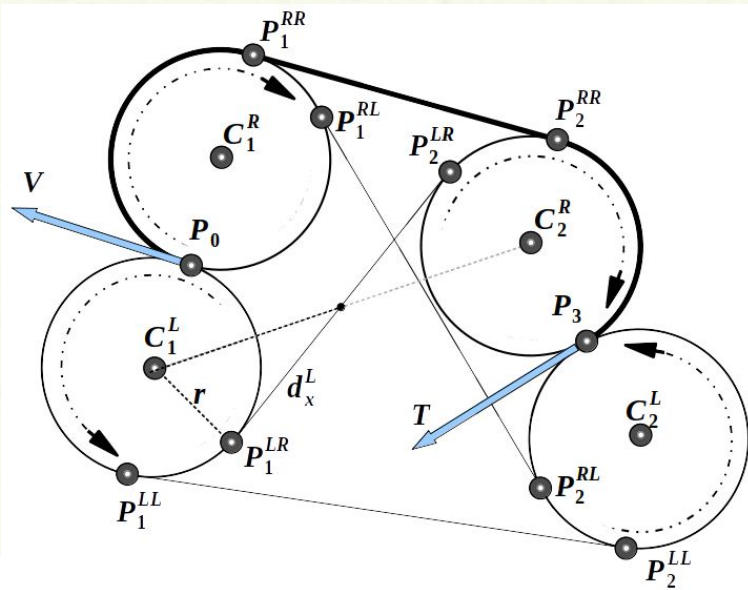
**!!! ПИЛОТИРОВАНИЕ
ТОЛЬКО ВРУЧНУЮ !!!**

РЕЗУЛЬТАТЫ

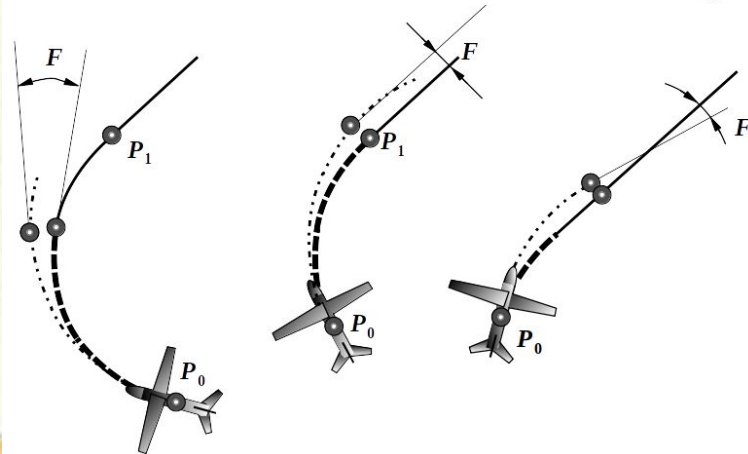
Технологичность и производственная эффективность

Управляющая информация, кинематические схемы и параметр управления

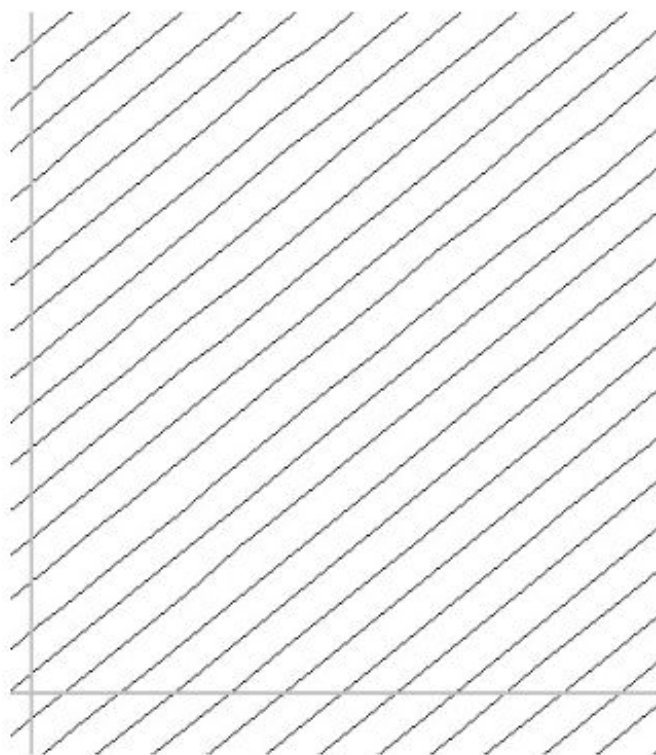
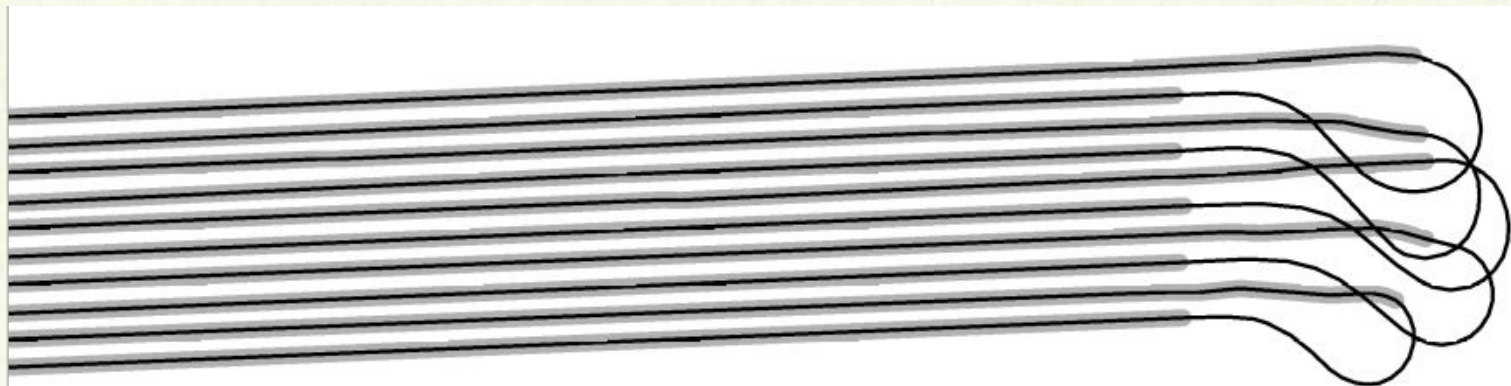
Заход на маршрут



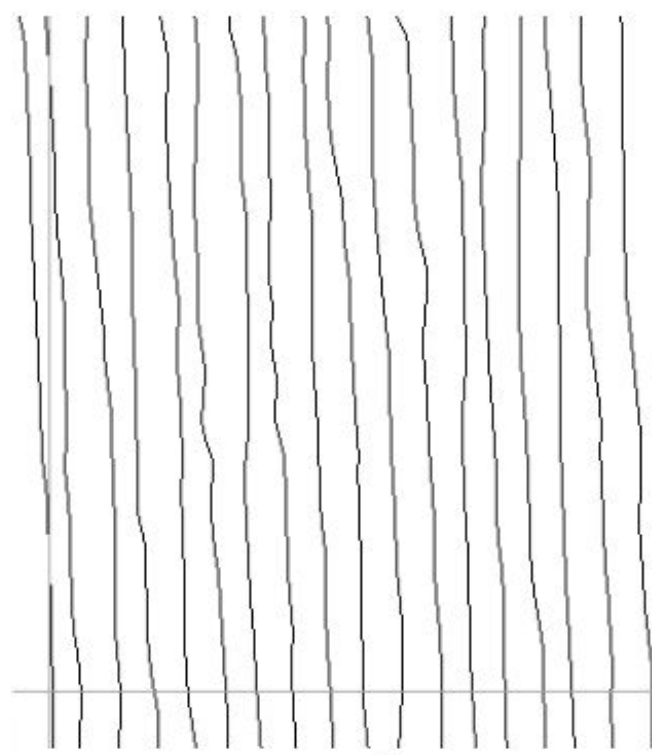
Стабилизация на маршруте



РЕЗУЛЬТАТЫ
Технологичность и производственная
эффективность



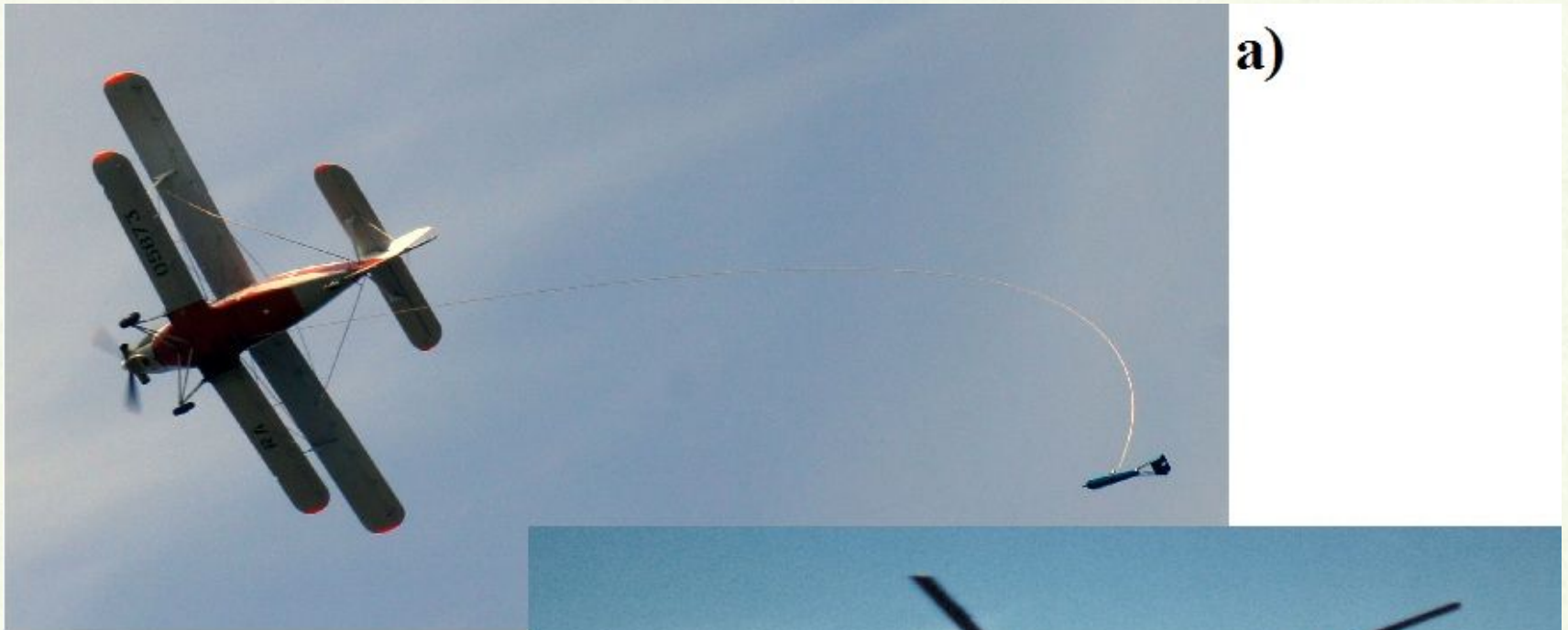
а)



б)

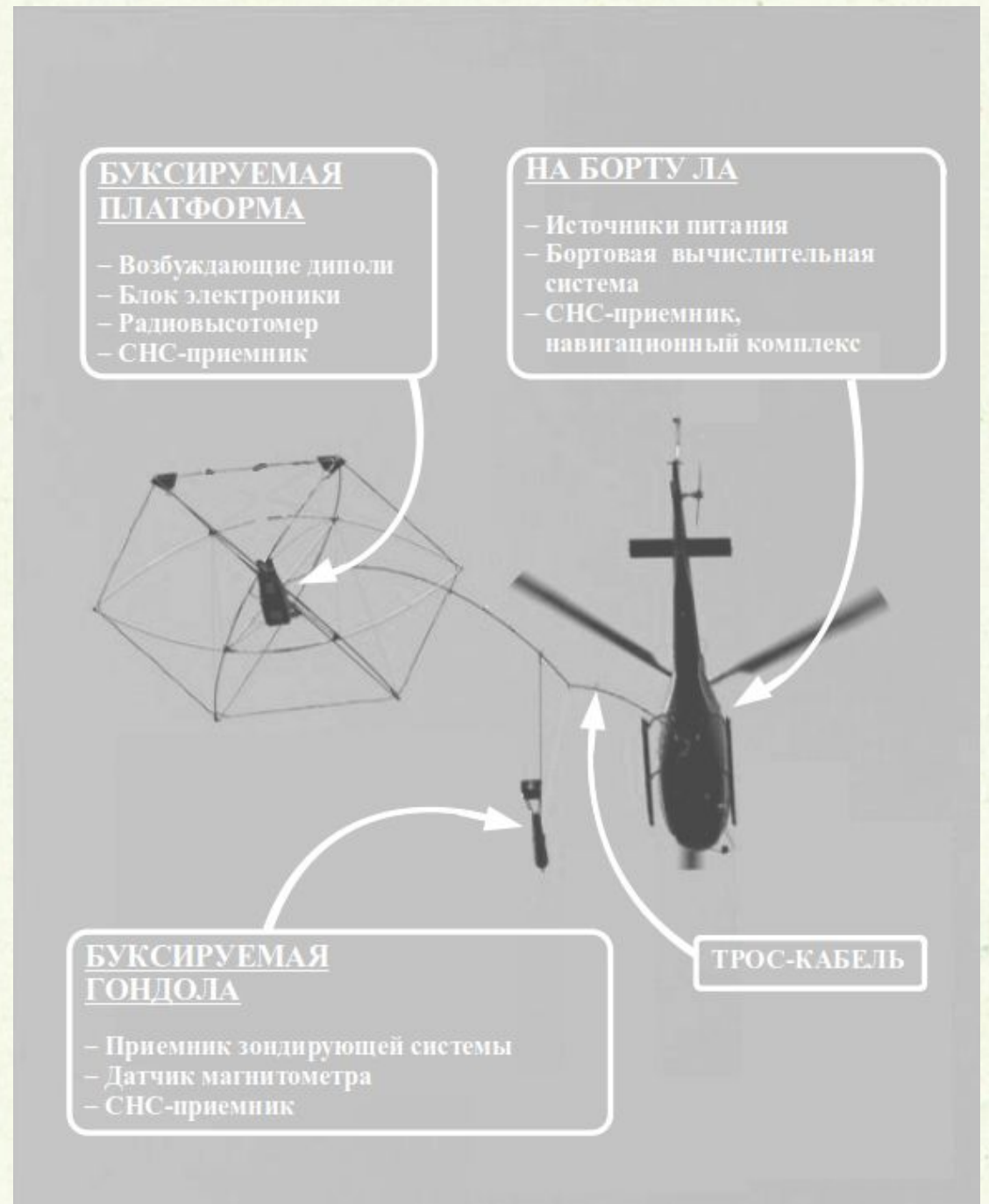
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Комплекс ЕМ4Н



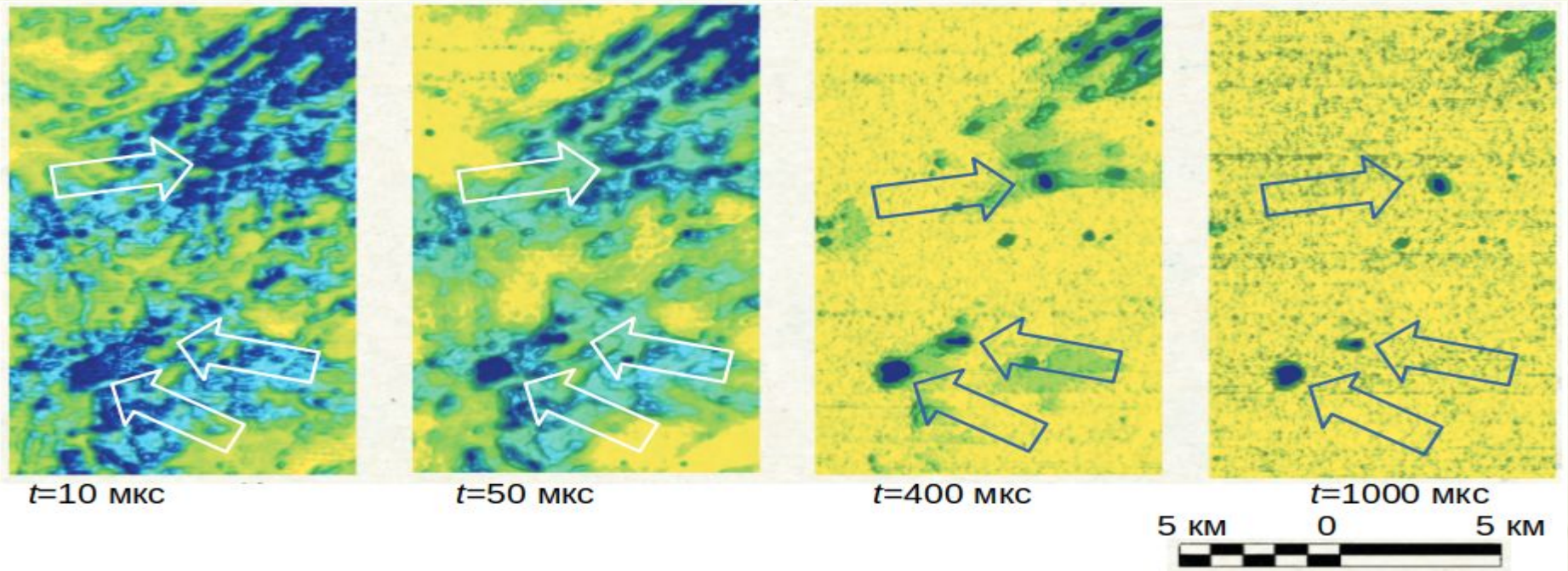
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Комплекс ЭКВАТОР



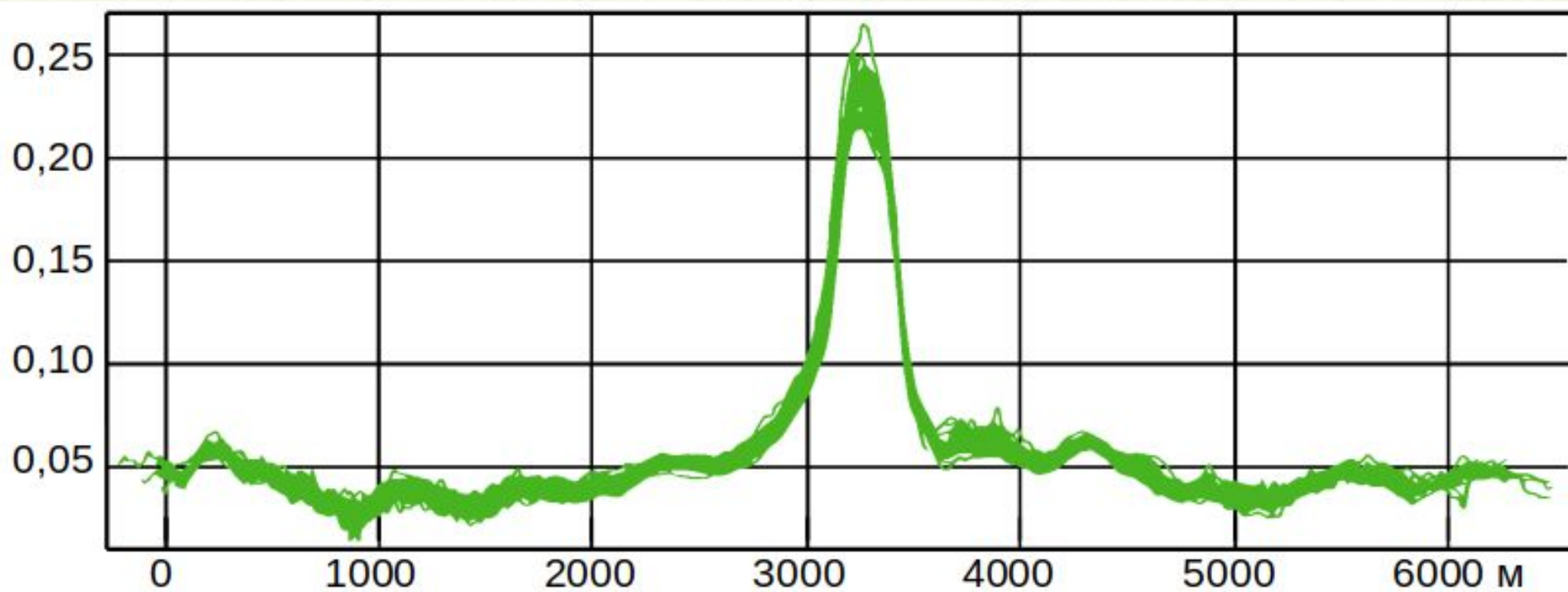
РЕЗУЛЬТАТЫ

*Одновременно частотное и временное представление
(комплекс ЭКВАТОР)*



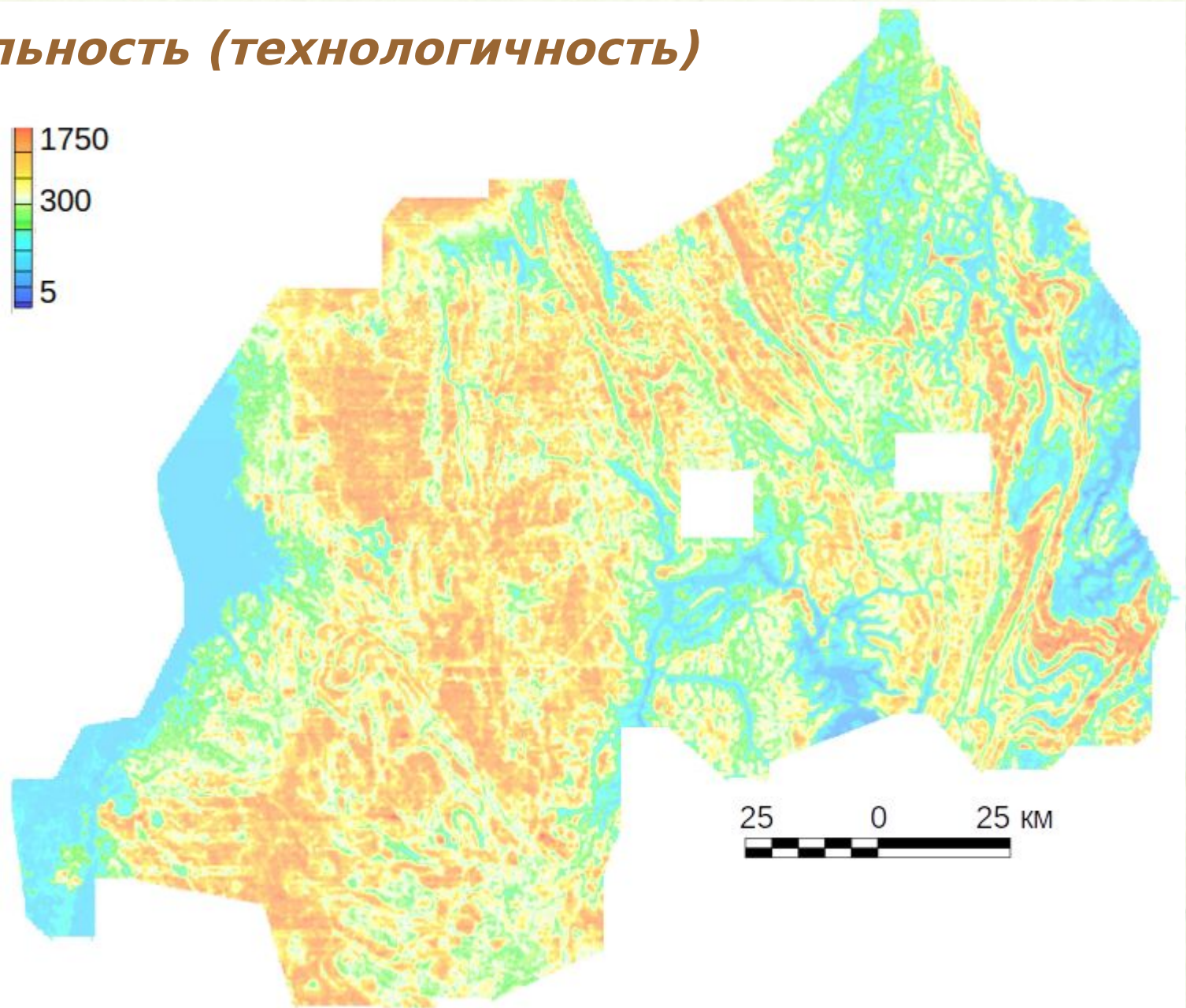
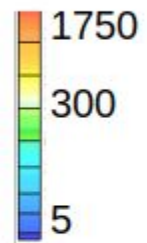
РЕЗУЛЬТАТЫ

Стабильность (комплекс ЭКВАТОР)



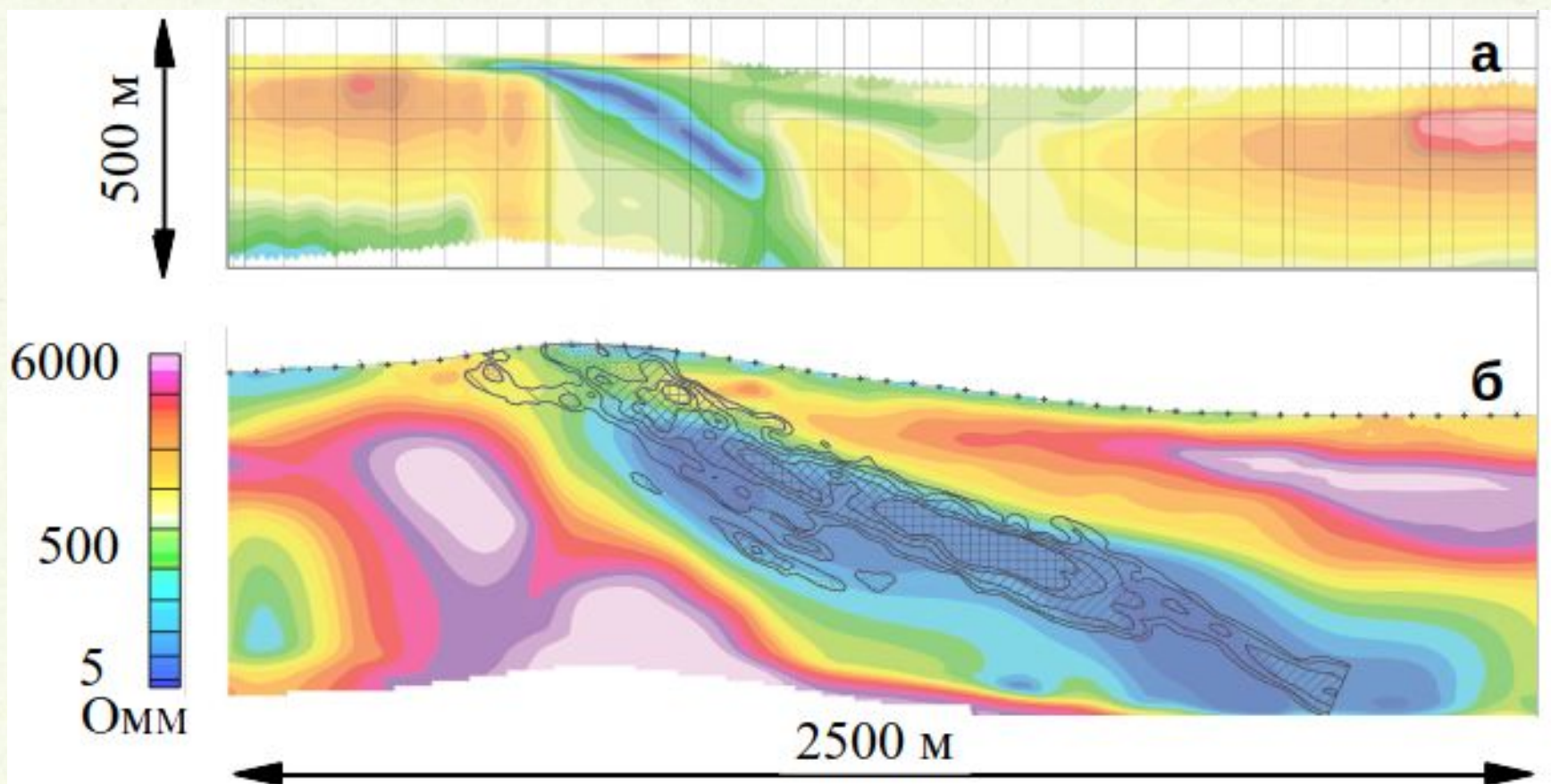
РЕЗУЛЬТАТЫ

Производительность (технологичность)



РЕЗУЛЬТАТЫ

Достоверность





**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ....**