



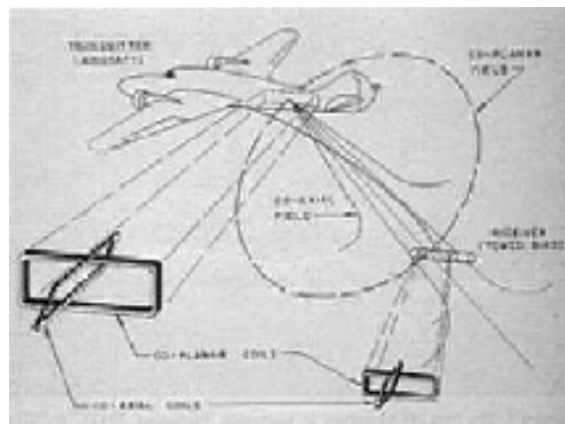
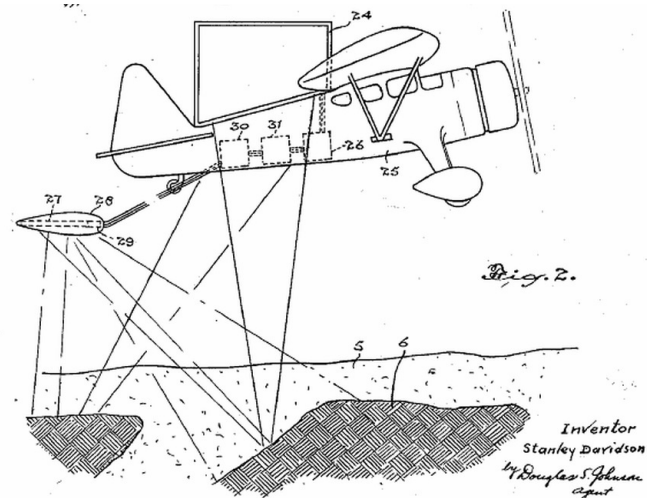


СОДЕРЖАНИЕ

1. История: дополнительные сведения
2. Особенности обработки сигналов:
чувствительность, стабильность, надежность
3. Альтернативный подход к эффекту ИВП:
обработка данных в частотной области

История: 1948 г.

Fountain, D. Airborne electromagnetic systems — 50 years of development // Exploration Geophysics, 1998, 29. – P. 1–11



История: XX век

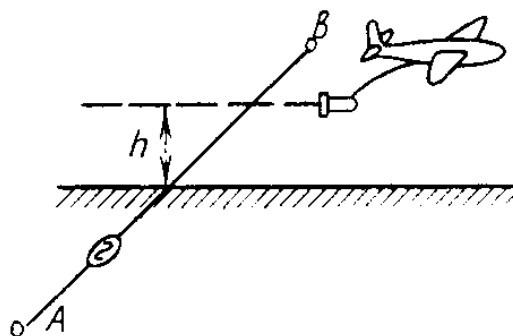
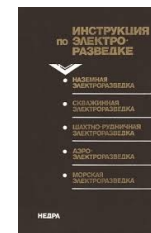
Светов, Б.С., Каменецкий, Ф.М. Аппаратура для индуктивной аэроэлектроразведки / Электроразведка: Справочник геофизика. М., Недра, 1979. – С. 161–168



Параметр	БДК-70	Turair	ВМП	АВЕМ _{RMF}	ДИП-АД	F(H)-400	ДИП-ЖК	TRIDEM	АМПП-2	INPUT
Страна	СССР	Canada	СССР	Sweden	СССР	Canada	СССР	Canada	СССР	Canada
Метод	БДК	НП	ДИП	ДИП	ДИП	ДИП	ДИП	ДИП	ДИП	ДИП
Сигнал	гармонический							«неустановившийся»		
ЛА	FW, RW	RW	2xFW, 1FW		FW, RW		FW		RW	FW
Источник	кабель	ГП	ВП+ГП		ГП	ГД	ГД		ГП	
Приемник	ВР	2ГР (2ВР)	ВР+ГР		ВР+ГР		ГР		ГР	ГР+ВР
Част./Вр.	81–976 Гц	200-800 Гц	612-2450 Гц	800 Гц	312, 2500 Гц	340, 1070 Гц	625, 5000 Гц	500–8000 Гц	125 Гц, 0,5–3 мс	288 Гц, 0,3–1,9 мс
# каналов	2	?	1	1	2	2	1	3	3	6
Изм.	$ H_x , \varphi_x$	$ H_2 / H_1 , \Delta\varphi$	$ C , \Delta\varphi$	$\text{Im } C, \text{Re } C$	H_b, H_a	$\text{Im } H_z$	$ H_x , \text{Im } H_x$	$\text{Im } H_x, \text{Re } H_x$	dH_z/dt	dH_7/dt
Мощность	2–4 А		500–750 Вт		8000 Ам ²	6000 Ам ²	600 Ам ²	?	60 кАм ²	300 кАм ²
Высота п.	50–70 м	15–30 м	50–70 м			20–40 м	35–50 м	50 м	50–60 м	
Разнос	~ 10 км		300–500 м	150–300 м	30–120 м	125 м	16,2 м	20 м	35–50 м	150 м
Произв(д)	160 км	300 км	400 км				300 км		200 км	?
Масса ап.	200 кг	?	138 кг	?	300 кг	160 кг	160 кг	?	280 кг	260 кг
Чувствит.	0,03	0,001	0,01	0.02–0,03	50 ppm	500 ppm	100 ppm	10 ppm	30 ppm	50 ppm

История: XX век

Инструкция по электроразведке:..., аэроэлектроразведка,
.../ М-во геологии СССР..., Ф.М. Каменецкий,...,
В.Д. Новак,..., Г.В. Прис,..., Э.С. Сидельников,... Л.:
Недра, 1984. – С. 165–193



- метод длинного кабеля
- метод радиокип (СДВР)
- метод дипольного индуктивного профилирования
- метод переходных процессов



История: XXI век

АО Геологоразведка: <http://geolraz.com/>



СДВР-АПУ

Частоты: 10 – 25 кГц

Измерения: H , E

Погрешность: не более 10%

ДИП-4F

Частоты: 128 Гц, 512 Гц, 2 кГц, 8 кГц

Измерения: H_x , H_y , H_z , (H_b , H_a)

Погрешность: не более 1000 ppm
(кабель > 100 м)



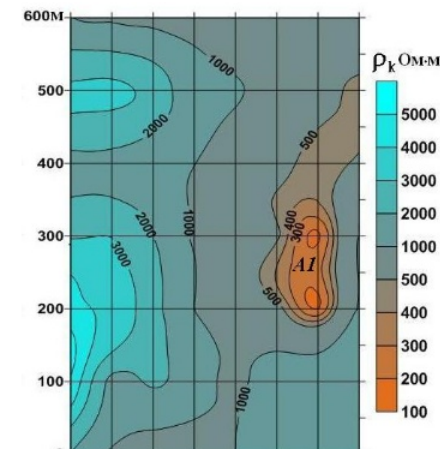
ФГБУН Институт Геофизики УрО РАН: <http://igfuroran.ru/>

АММ3-2 (БДК, НП)

Частоты: 19,5 Гц, 78 Гц, 312 Гц.

Измерения: H_x , H_y , H_z

Чувствительность: 0,3 пТл для 19,5 Гц



История: XXI век

АО ГНПП Аэрогеофизика: <http://aerogeo.ru/>



ДИП-А (1996 – 2000)
Частоты: 273, 1092, 4368 Гц
Измерения: H_x , H_y , H_z , (H_b , H_a)

ДИП-4А (2000 – 2005)
Частоты: 130 Гц, 520 Гц, 2,1 кГц, 8,4 кГц
Измерения: H_x , H_y , H_z , (H_b , H_a)
Погрешность: не более 400 ppm
(кабель 70 м)

ООО Геотехнологии: <http://geotechnologies-rus.com/>



ЕМ4Н (с 2006)
Частоты: 130 Гц, 520 Гц, 2,1 кГц, 8,4 кГц
Измерения: H_x , H_y , H_z , (Im , Re вторичного поля)
Чувствительность: 50 – 200 ppm
(кабель 70 м)



История: XXI век

ЗАО Аэрогеофизическая разведка <http://aerosurveys.ru/>

Импульс А-150 (А-250, А-450)

Частота: 25(50) Гц

Время спада: 0 – 15 мкс

Измерения: dH_z/dt (до 3-х приемников)

ДММ: 160 кАм² (250 кАм², 450 кАм²)

Масса: 550 кг (внешняя подвеска) (? , ?)

ООО Геотехнологии: <http://geotechnologies-rus.com/>

ЭКВАТОР (с 2010)

Частота: 77 Гц

Измерения: $H_x, H_y, H_z,$
 $dH_x/dt, dH_y/dt, dH_z/dt,$

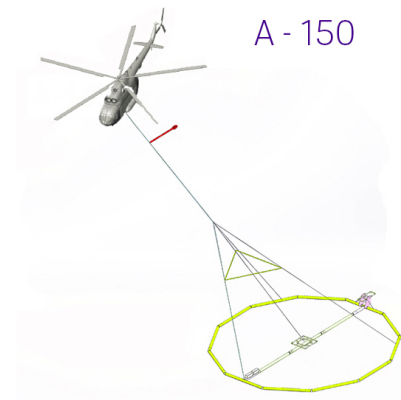
(Im, Re вторичного поля)

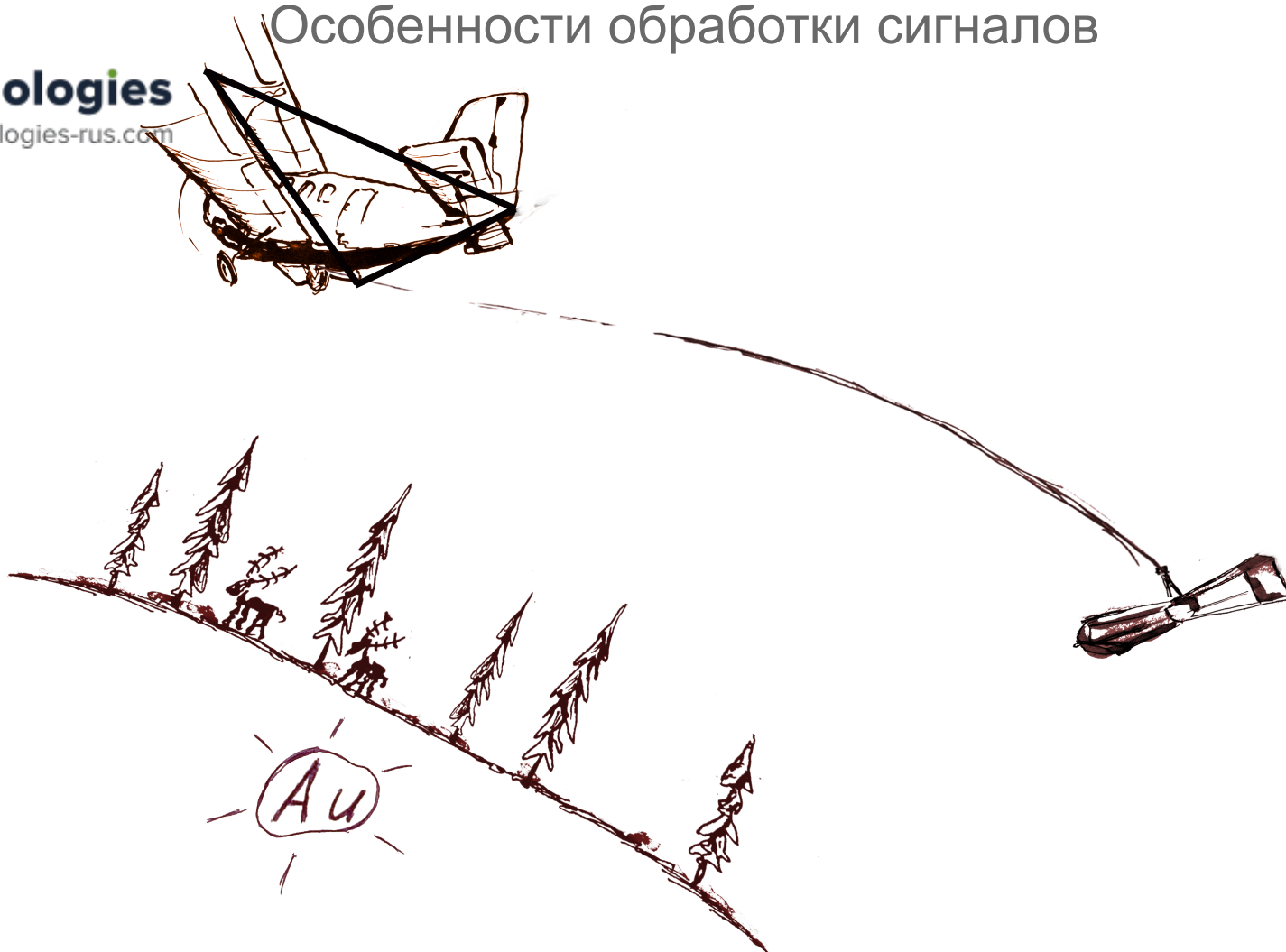
Чувствительность: 1 – 10 ppm

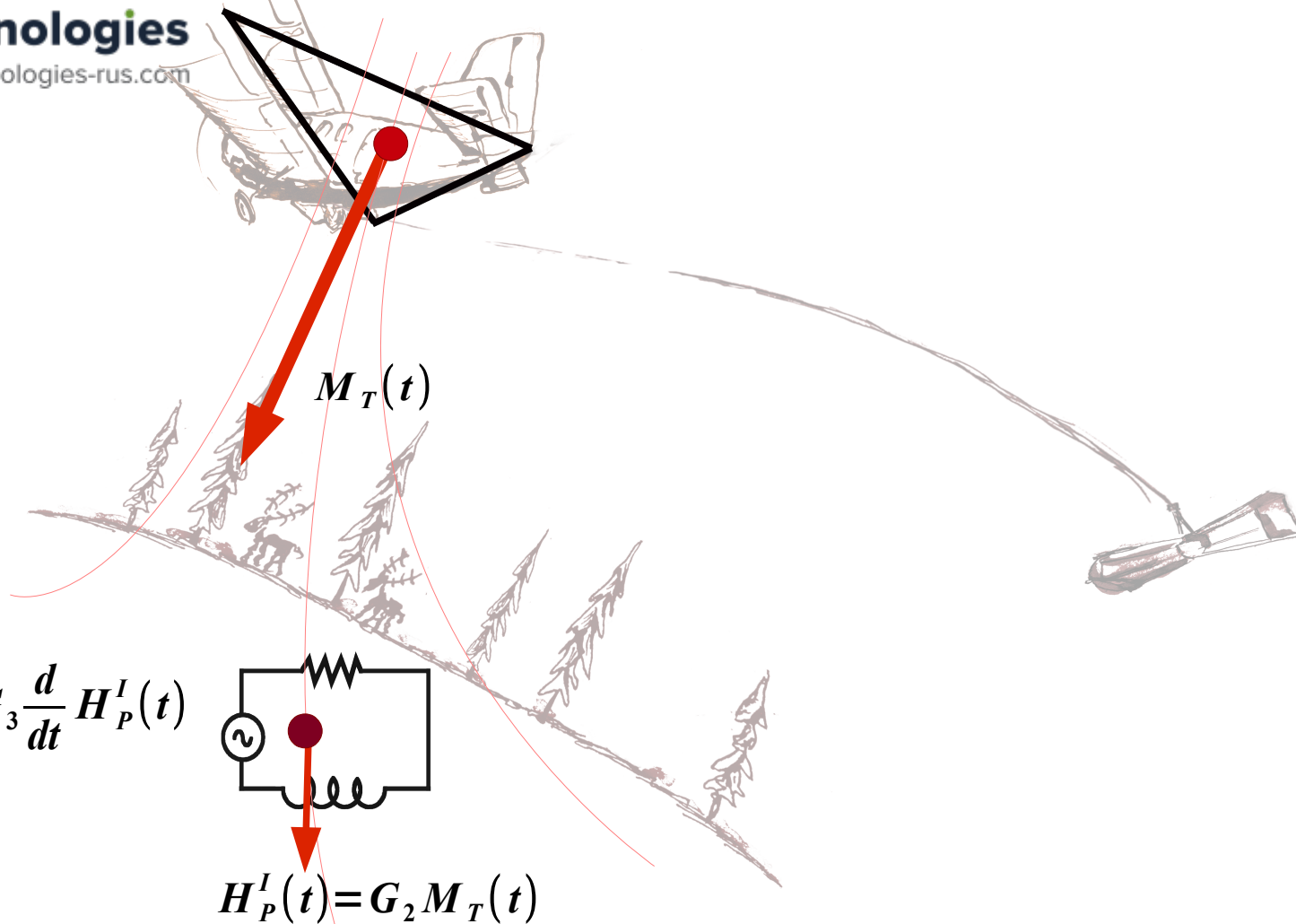
(Tx-Rx 40 м)

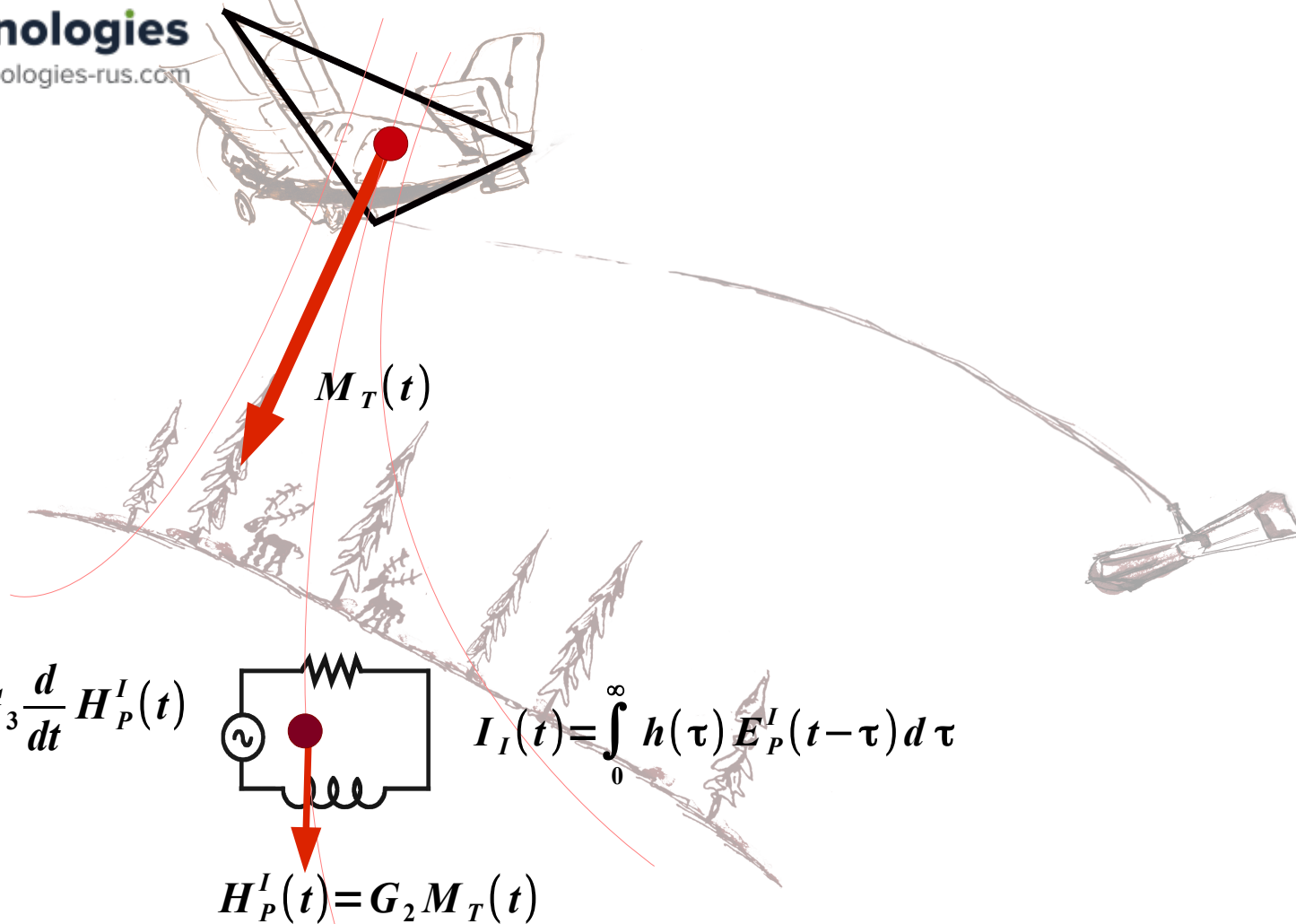
ДММ: 100 кАм²

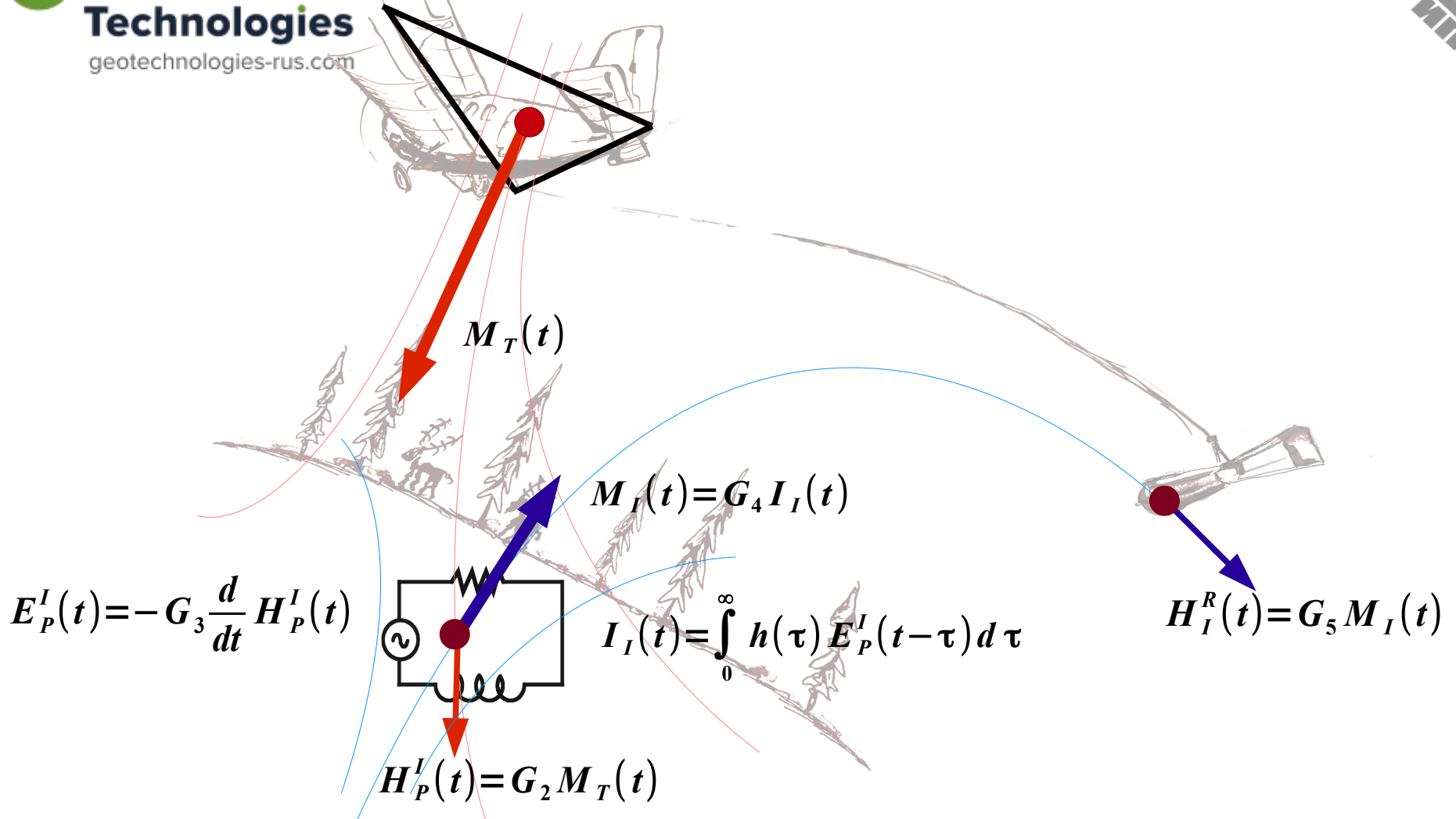
Масса: 150 кг (внешняя подвеска)

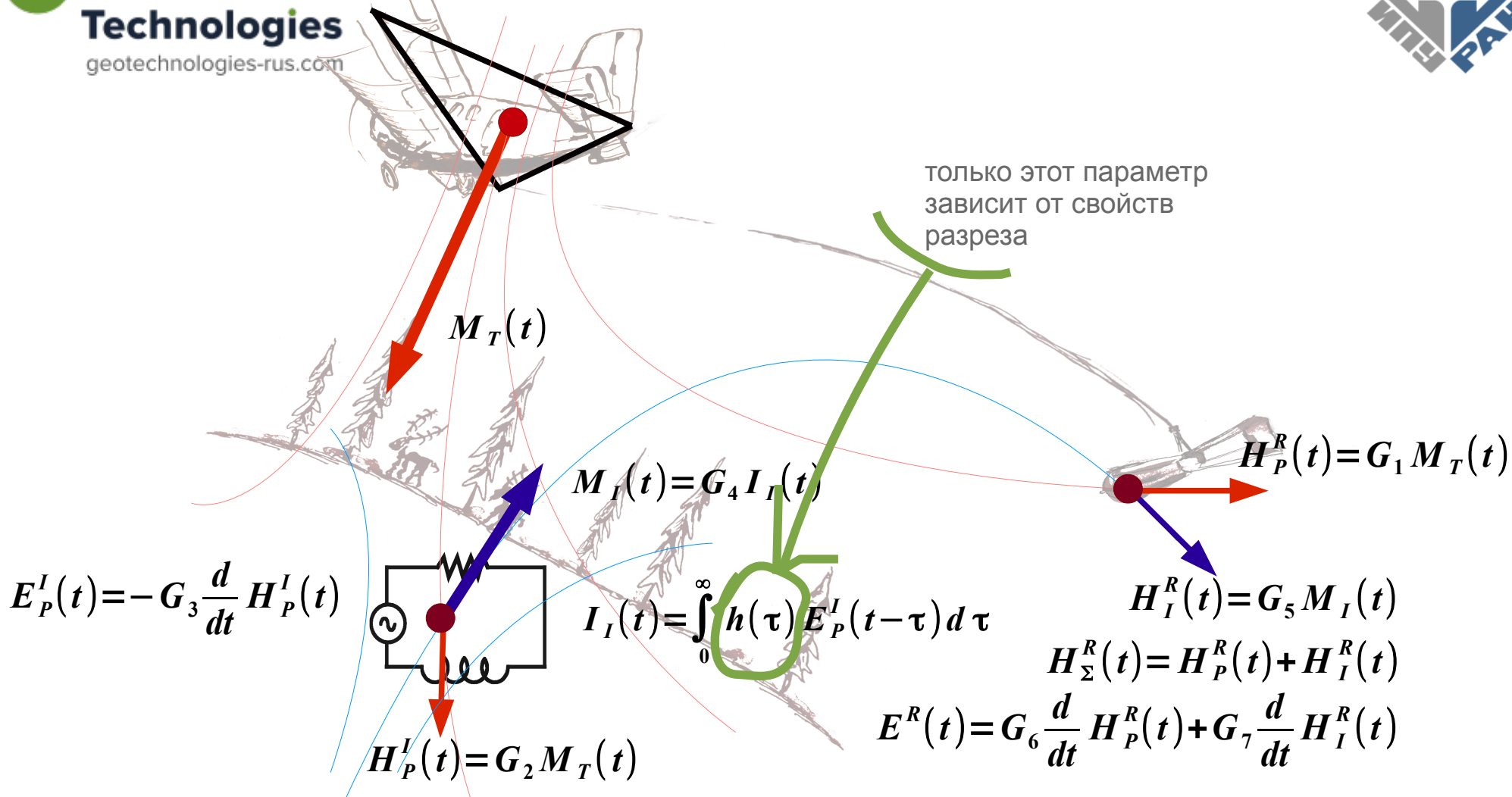








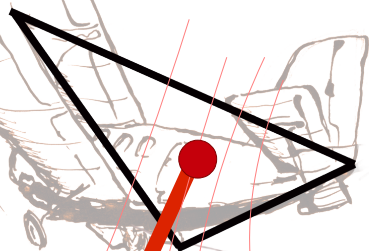




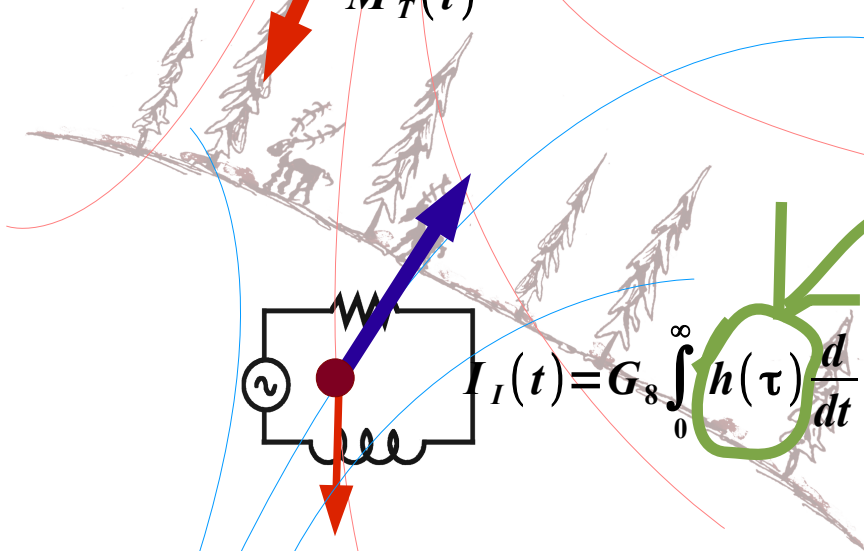
Особенности обработки сигналов

Искажения, обусловленные несовершенством приемной системы затрудняют выделение полезного сигнала

$$u(t) = \int_0^{\infty} h_A(\tau) E^R(t-\tau) d\tau$$

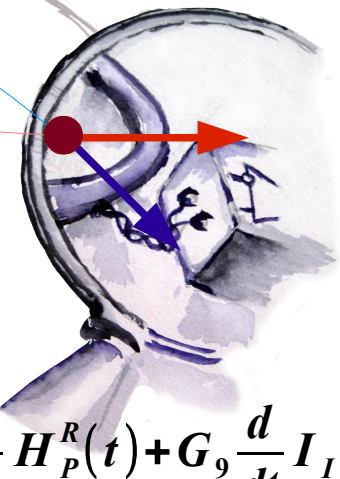


$M_T(t)$



$$I_I(t) = G_8 \int_0^{\infty} h(\tau) \frac{d}{dt} M(t-\tau) d\tau$$

$$E^R(t) = G_6 \frac{d}{dt} H_P^R(t) + G_9 \frac{d}{dt} I_I(t)$$



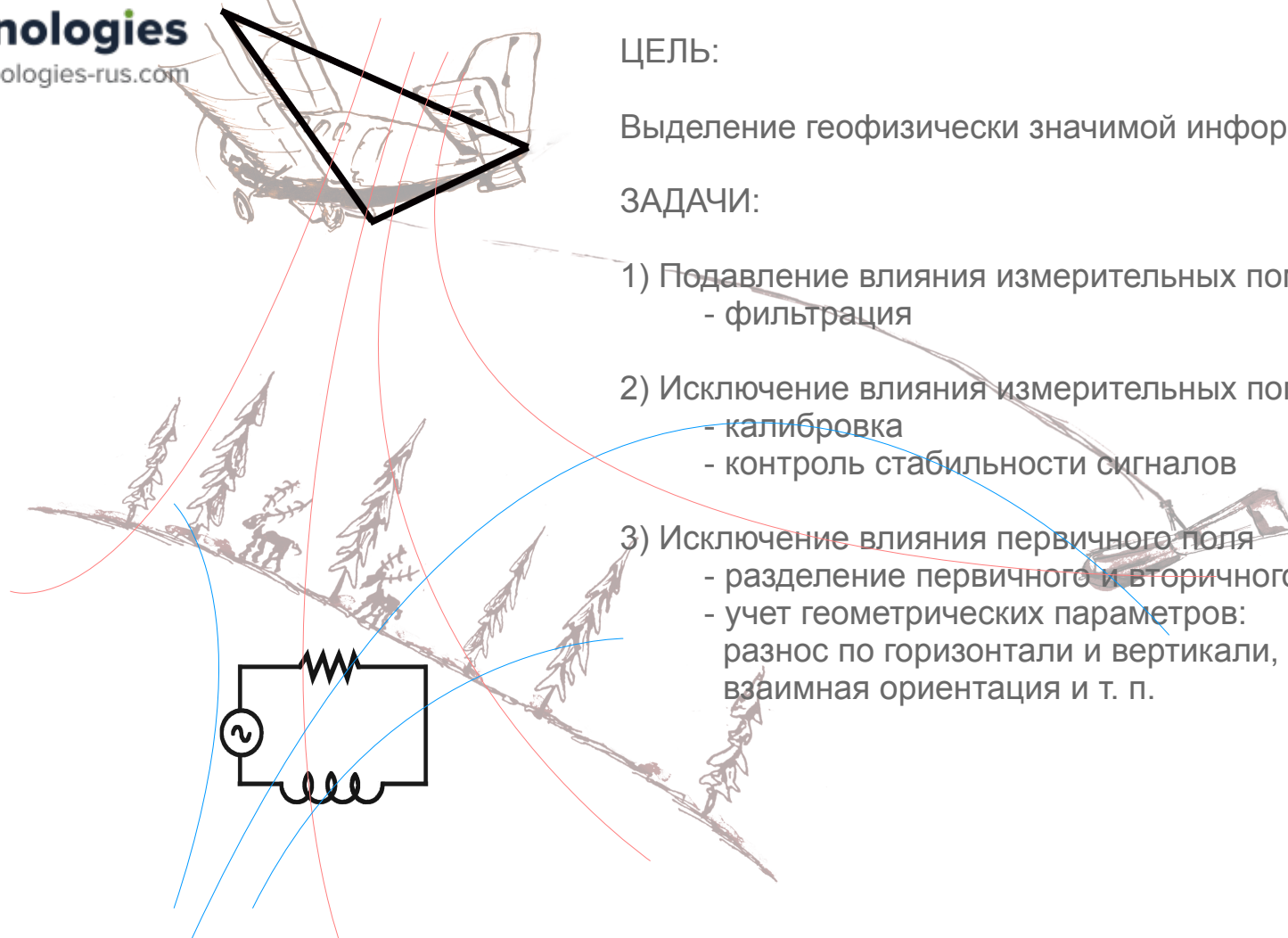
Особенности обработки сигналов

ЦЕЛЬ:

Выделение геофизически значимой информации

ЗАДАЧИ:

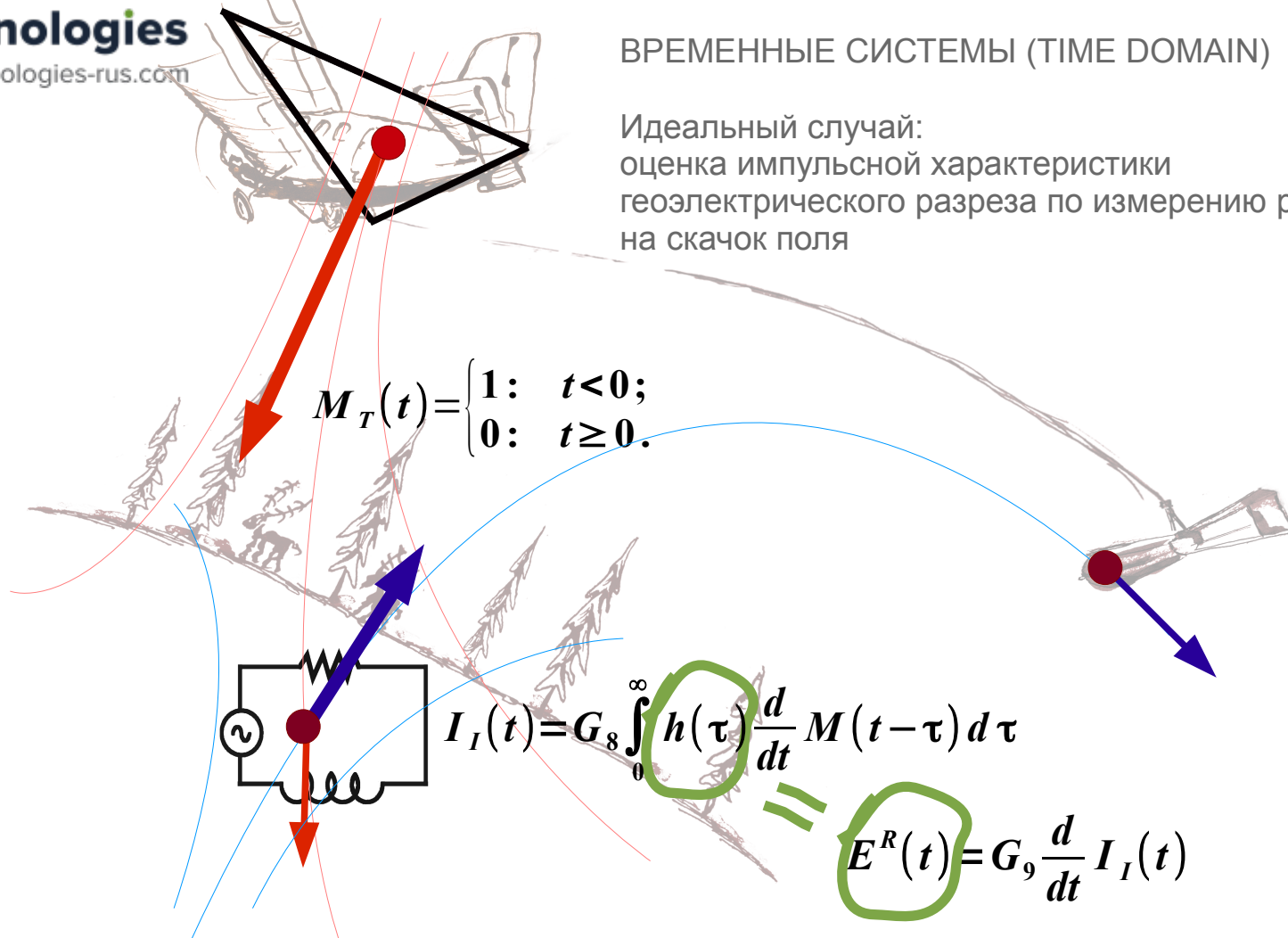
- 1) Подавление влияния измерительных помех
- фильтрация
- 2) Исключение влияния измерительных погрешностей
- калибровка
- контроль стабильности сигналов
- 3) Исключение влияния первичного поля
- разделение первичного и вторичного полей
- учет геометрических параметров:
разнос по горизонтали и вертикали, высота,
взаимная ориентация и т. п.



Особенности обработки сигналов

ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)

Идеальный случай:
оценка импульсной характеристики
геоэлектрического разреза по измерению реакции
на скачок поля



Особенности обработки сигналов

ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)



Input

Легендарные системы

АМПП-2



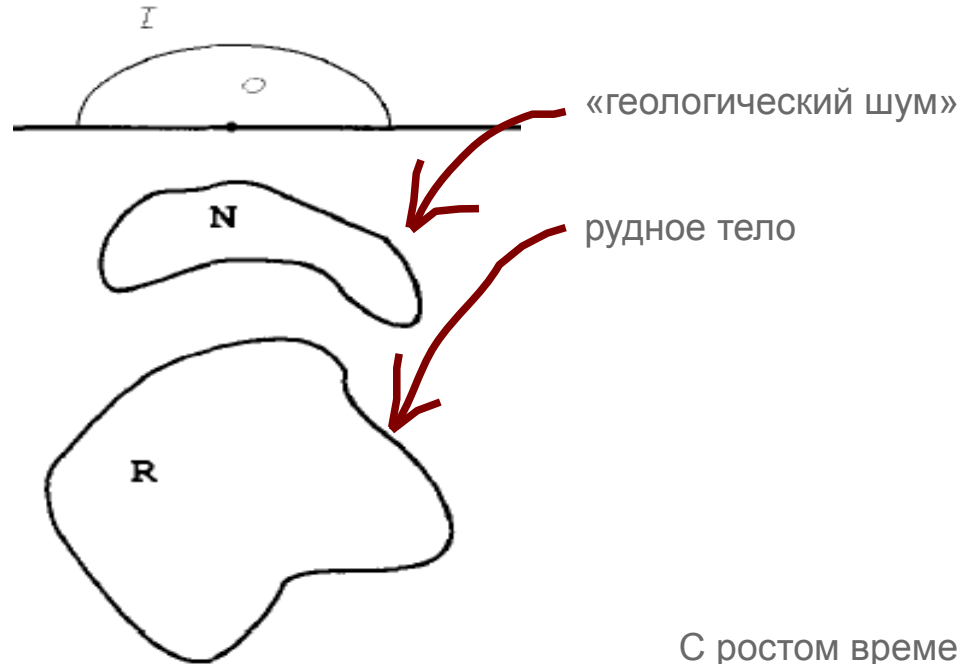
Heli Input



VTEM



Эффективность



Приближение петли с током:

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

Влияние «геологического шума»

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

$$G_N \gg G_R \quad t \rightarrow 0 \quad R \rightarrow \frac{G_N}{G_R}$$

$$\tau_N \ll \tau_R \quad t \rightarrow \infty \quad R \rightarrow 0$$

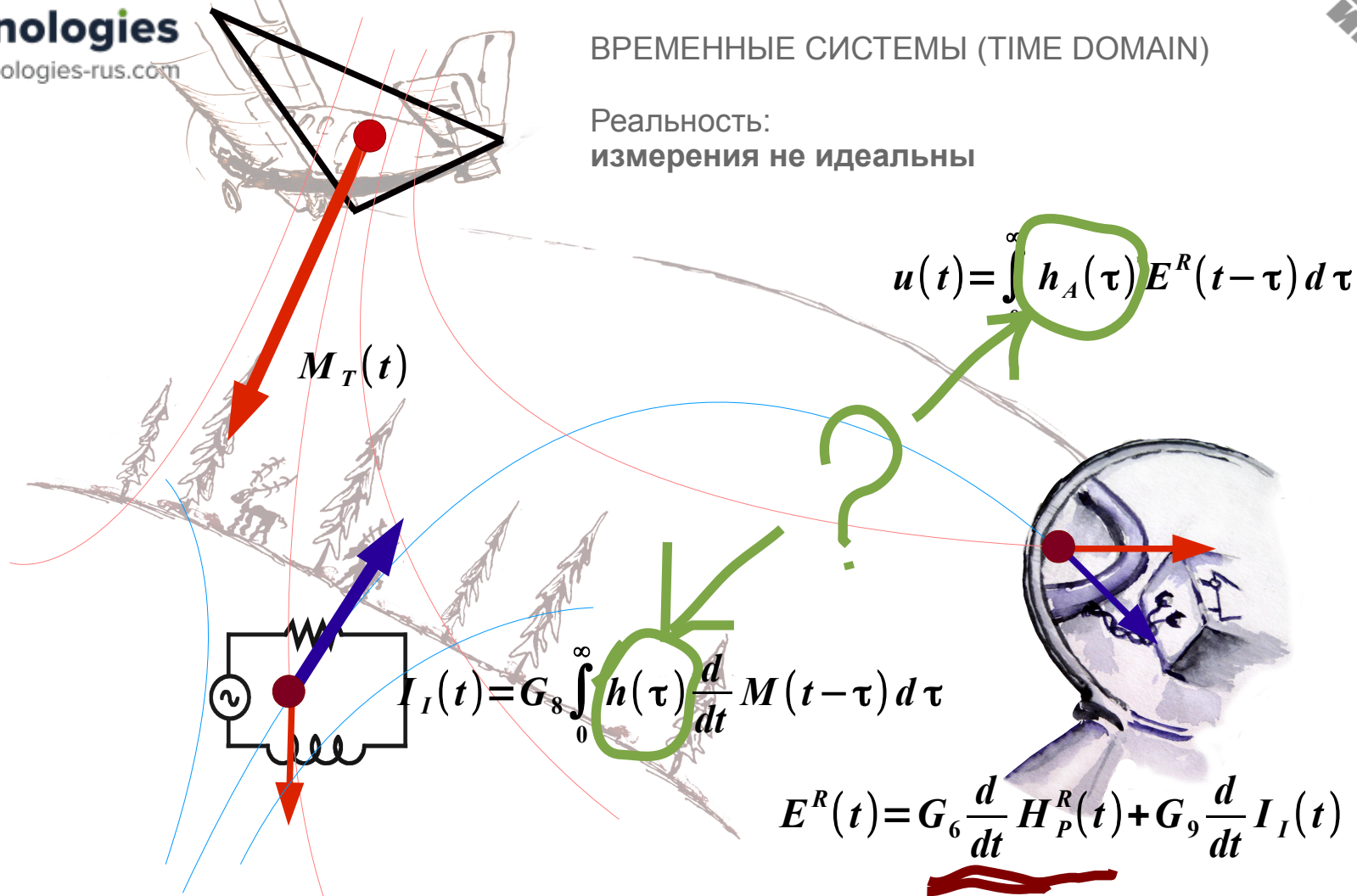
С ростом времени отклик от рудного тела все более превосходит отклик «геологического шума»

Рудное тело можно легко детектировать, если чувствительность приемника позволяет

Особенности обработки сигналов

ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)

Реальность:
измерения не идеальны



Особенности обработки сигналов

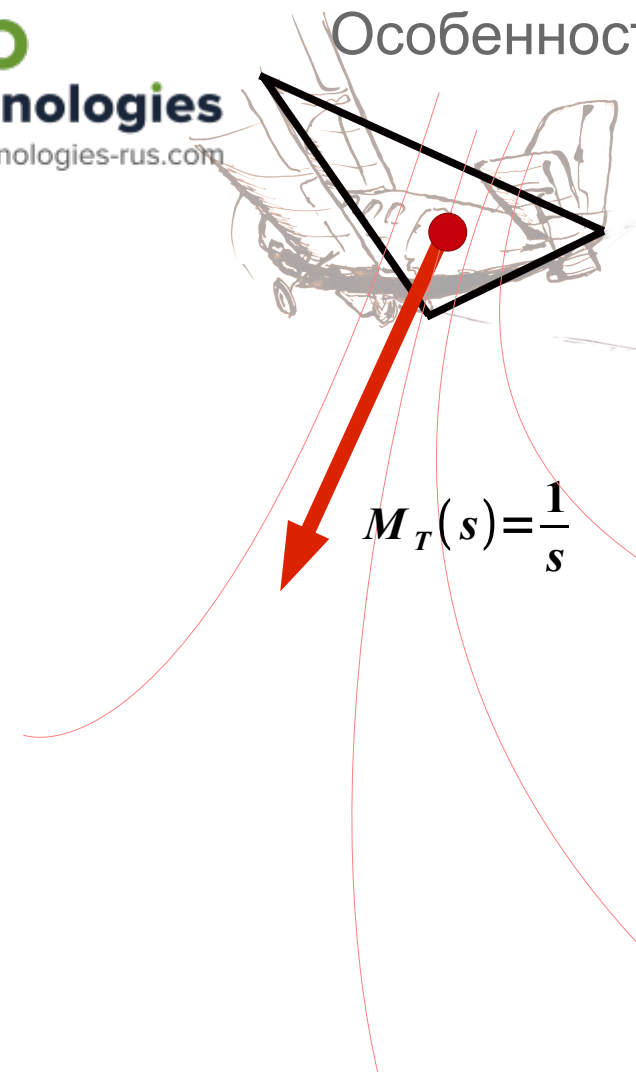
ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)

Компенсация:

измерения не идеальны

выполним преобразование Лапласа $f(s) = L\{f(t)\}$

На большой высоте, где нет оклика

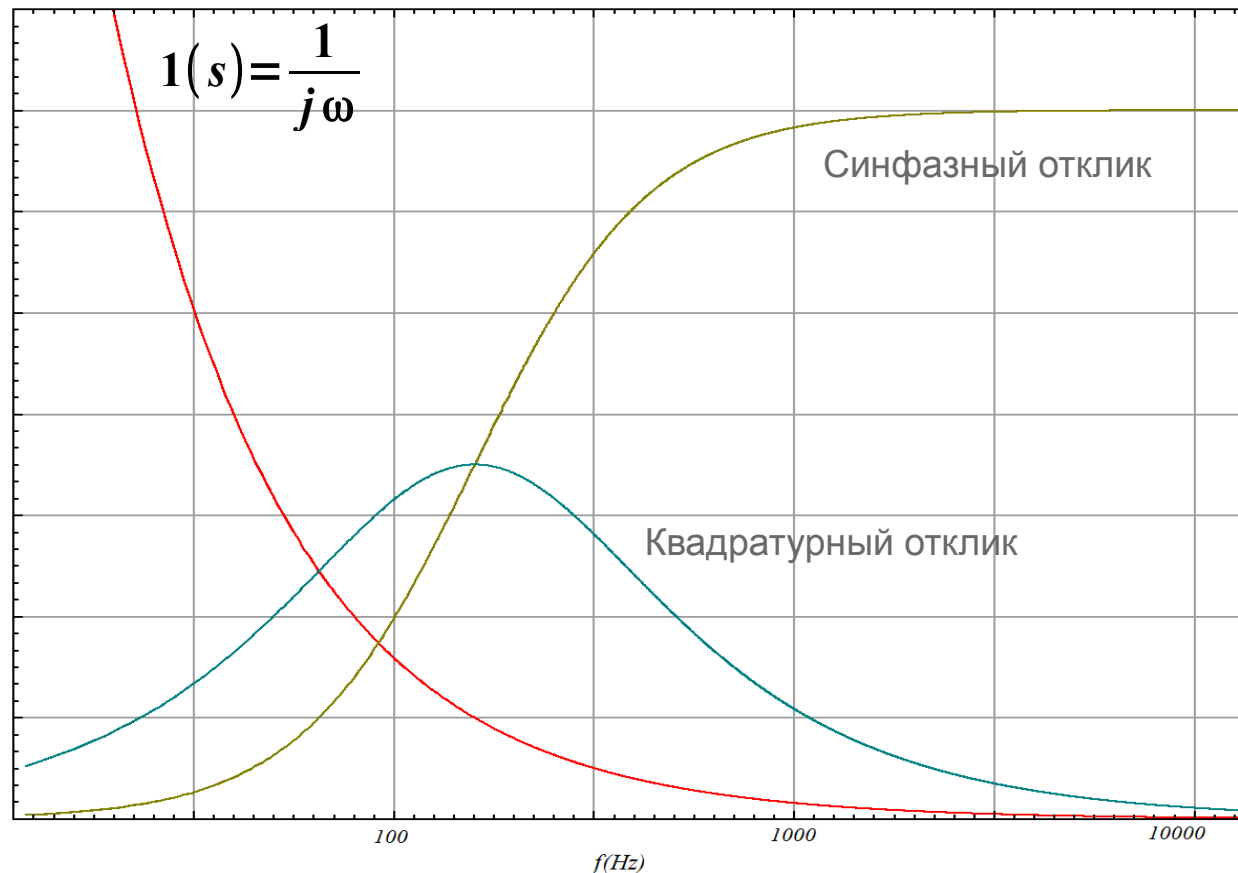

$$M_T(s) = \frac{1}{s}$$

$$u(s) = h_A(s)(sH_P^R(s))$$

Вычислим $h_A^{-1}(s) = \frac{\delta(s)}{u(s)}$
и полагая $h_A^{-1}(s) = \text{const}$

применим коррекцию ко всем данным:

$$u_C(t) = L^{-1}\{h_A^{-1}(s)u(s)\}$$

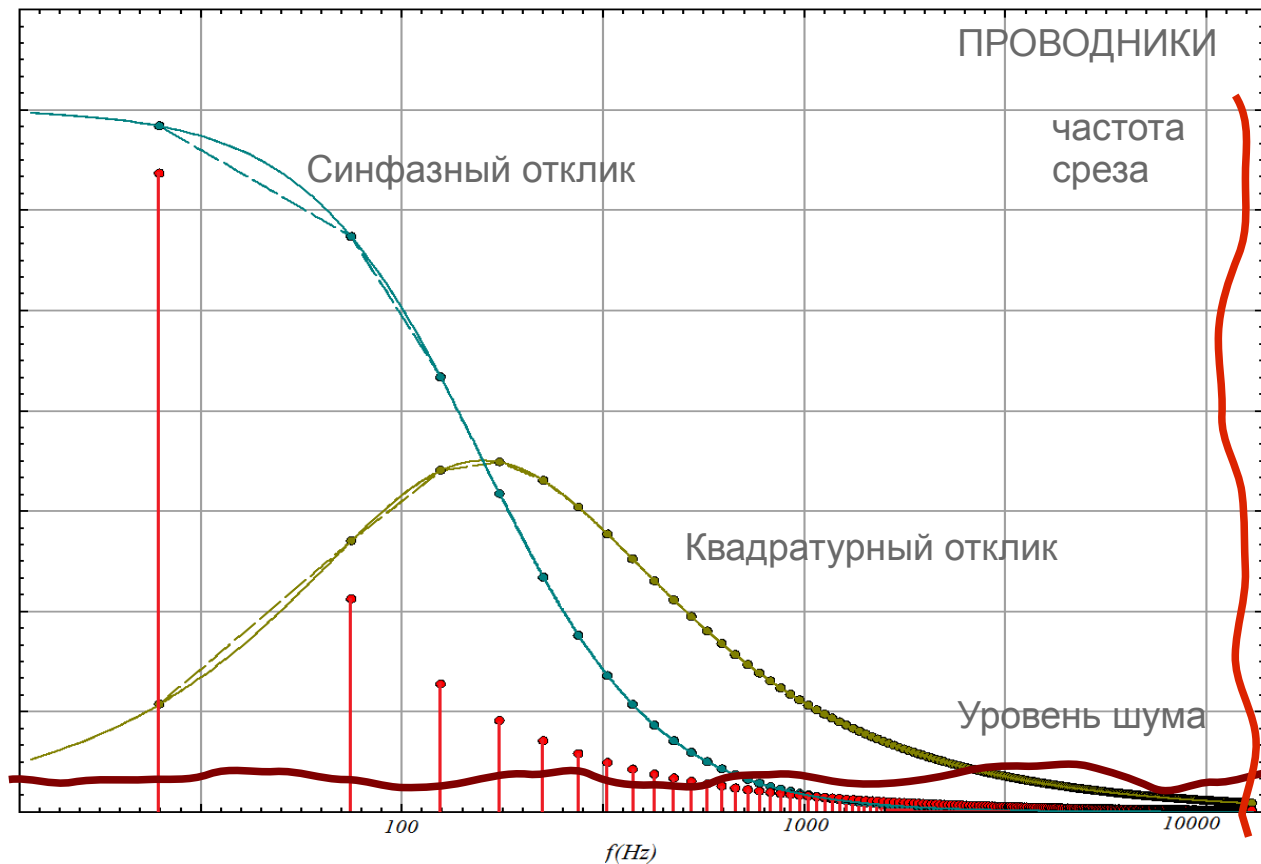


Особенности обработки сигналов



ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)

Спектральное представление

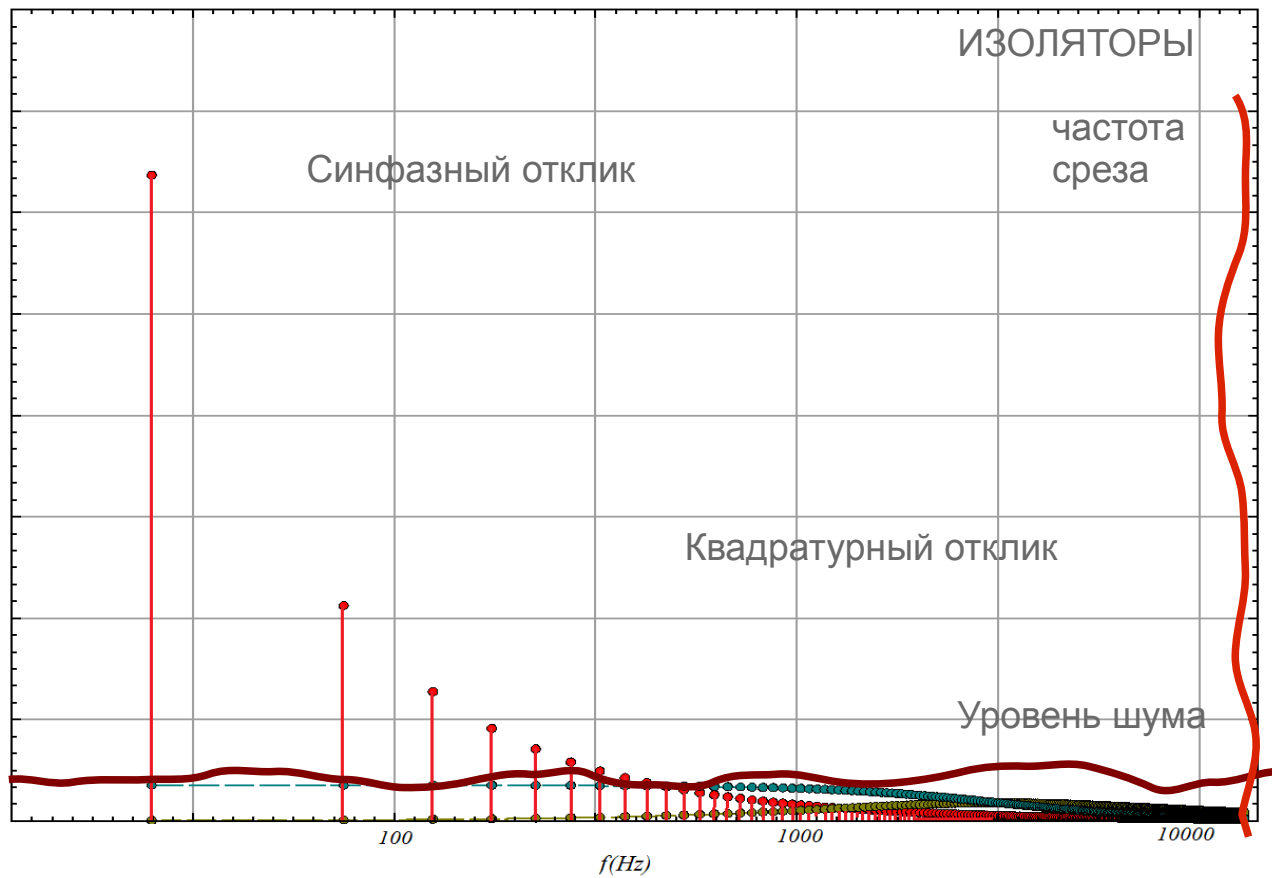


Особенности обработки сигналов



ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)

Спектральное представление



Особенности обработки сигналов

ВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (TIME DOMAIN)

Преимущества

- эффективность при поиске проводящих объектов в присутствии перекрывающих отложений
- малое влияние первичного поля и геометрических факторов для off-time систем
- высокая чувствительность для off-time систем – нет необходимости измерять первичное поле
- много частот в спектре возбуждения

Недостатки

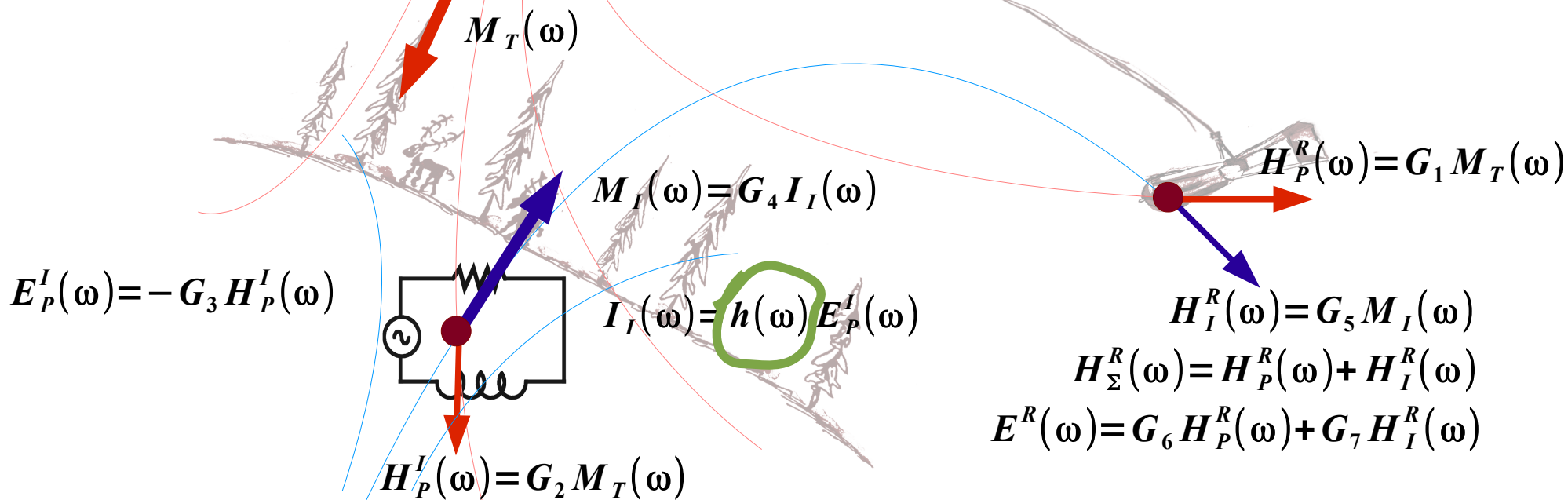
- низкая чувствительность к контрастам в высокоомных областях
- необходимо учитывать ограниченность частотного диапазона
- нет первичного поля для off-time систем
- высокие частоты имеют маленькую амплитуду



Особенности обработки сигналов

ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)

Идеальный случай:
оценка частотной характеристики
геоэлектрического разреза по измерению реакции
на большом наборе частот



ДИП-А(Д)



F-400



Легендарные системы

DIGHEM



EM4H




Особенности обработки сигналов

ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)

Компенсация:
измерения не идеальны

На большой высоте, где нет оклика


$$M_T(t) = M_{\text{Re}} \cos \omega t + i M_{\text{Im}} \sin \omega t$$


$$H_P^R(\omega) = G_1 M_T(\omega)$$

Если известны геометрические параметры,

вычислим $H_P^R(\omega) = \Omega(R) \cdot M_T(\omega)$

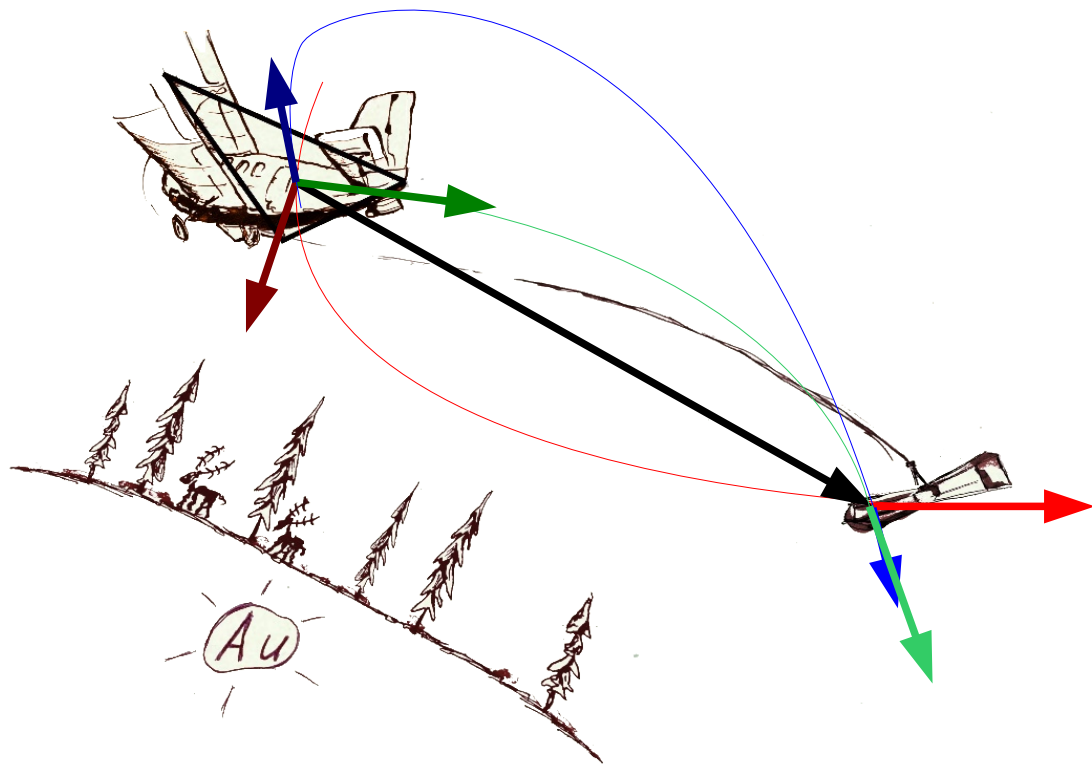
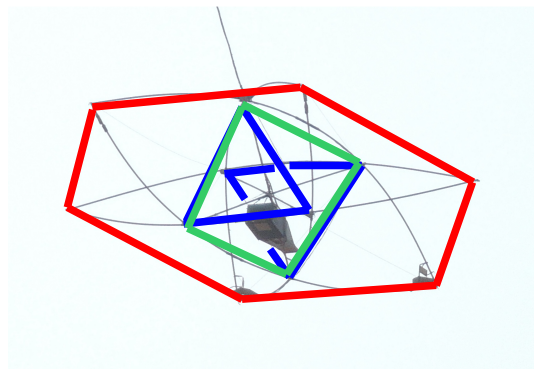
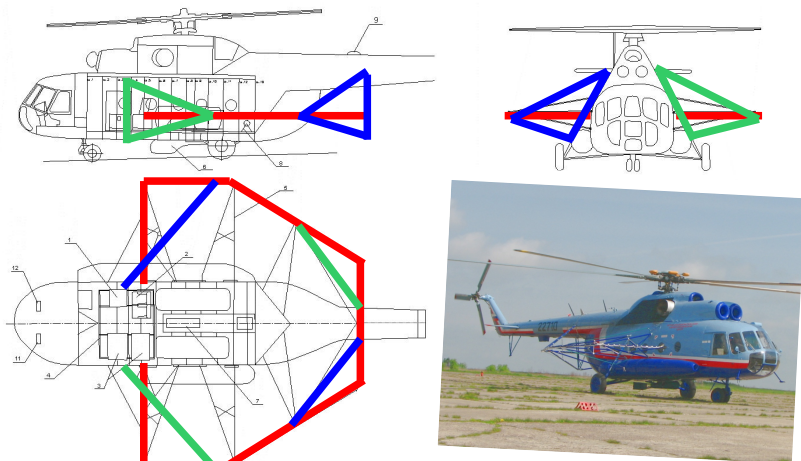
и полагая $M_T(\omega) = \text{const}$

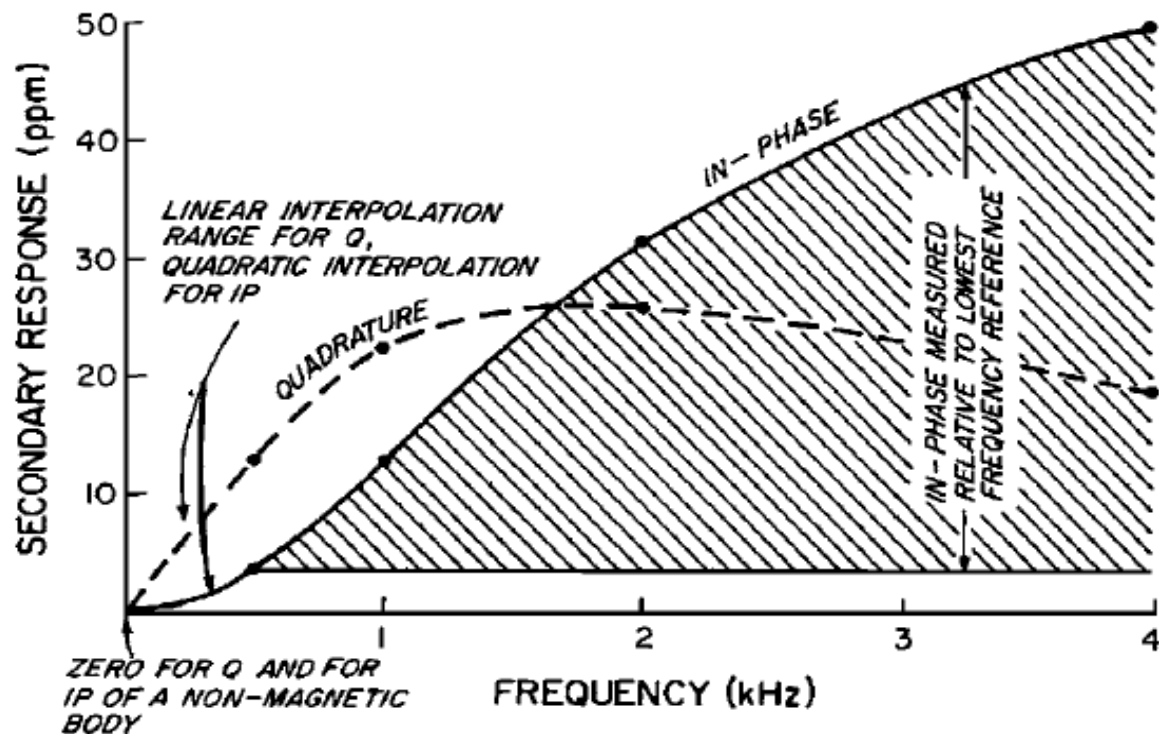
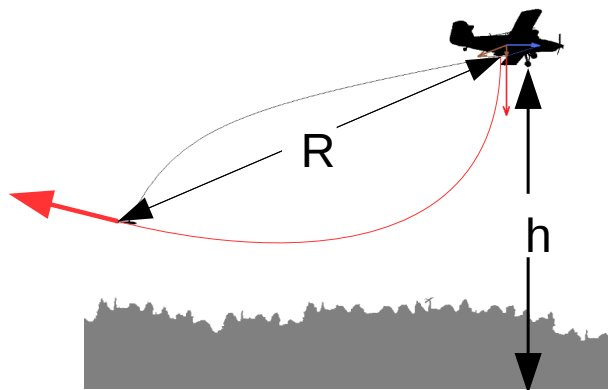
применим коррекцию ко всем данным:

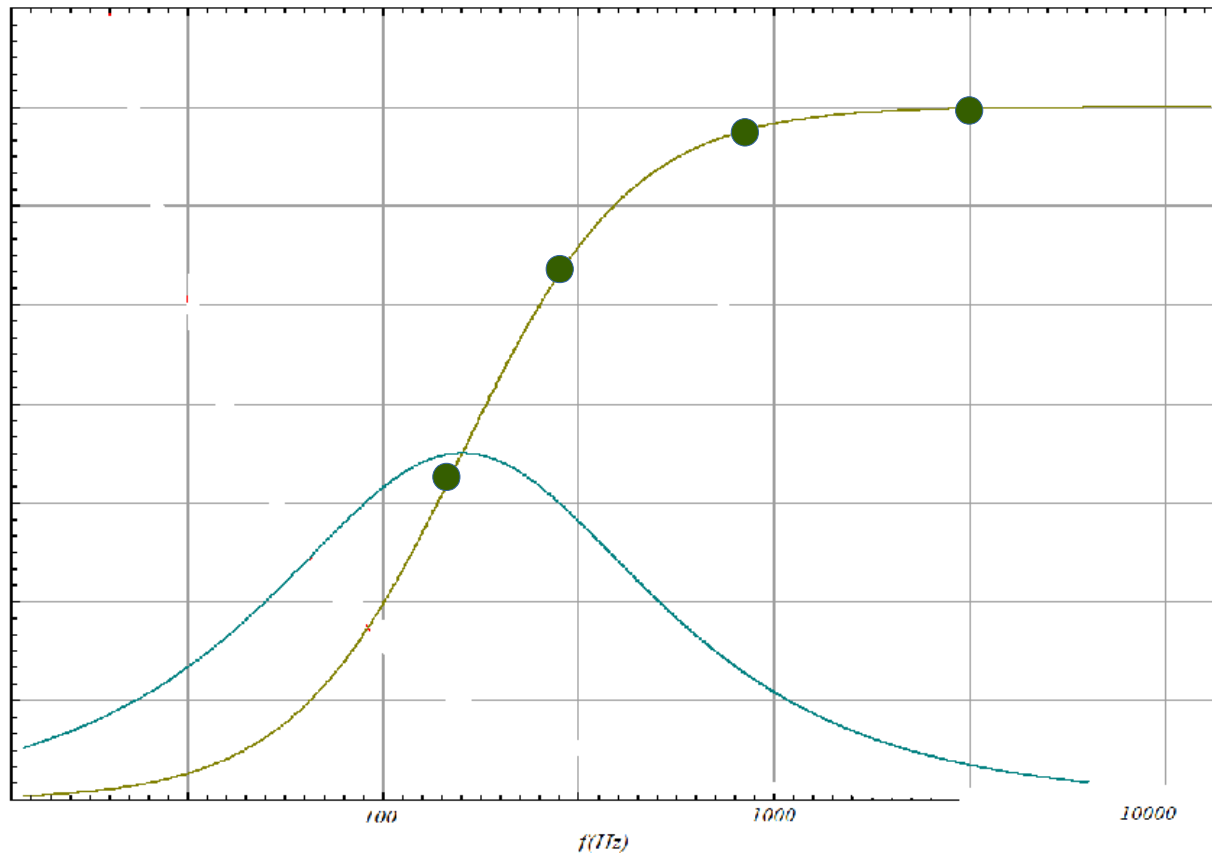
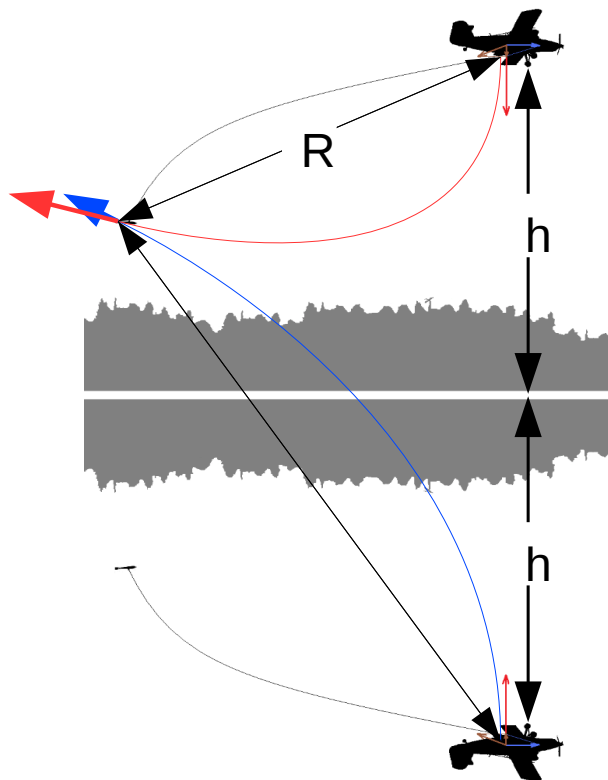
$$H_I^R(\omega) = H_\Sigma^R(\omega) - H_P^R(\omega)$$

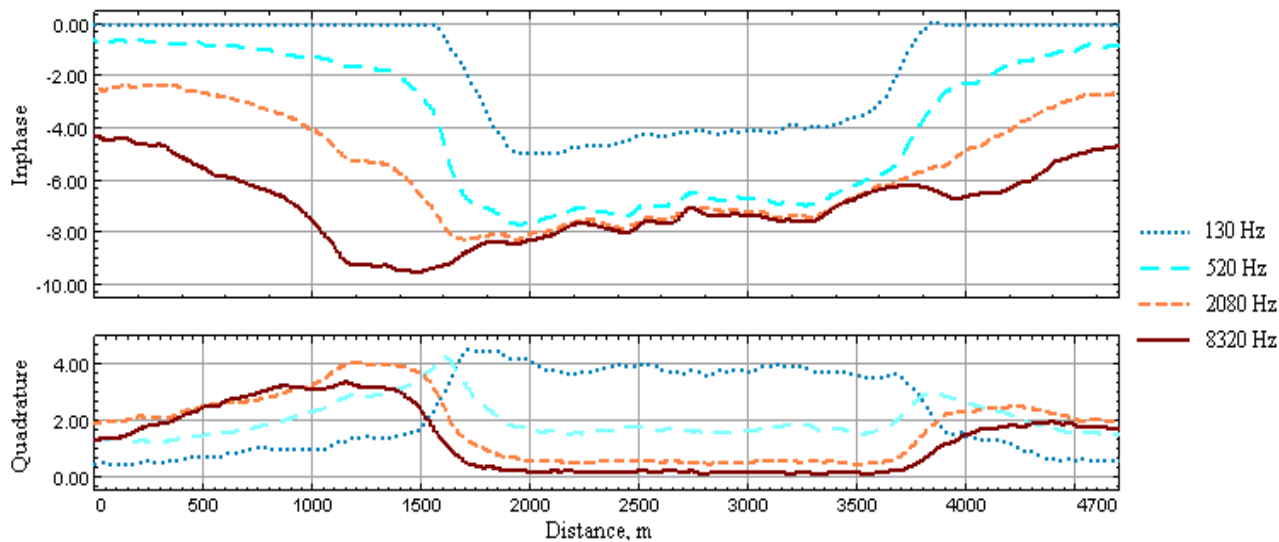
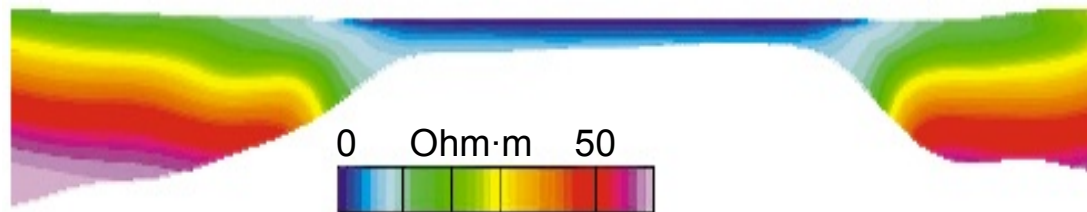
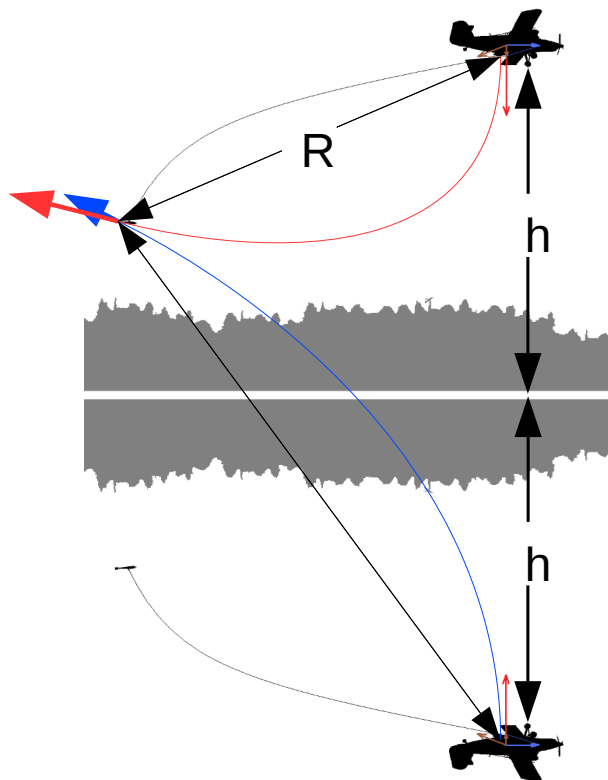
ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)

Учет геометрии







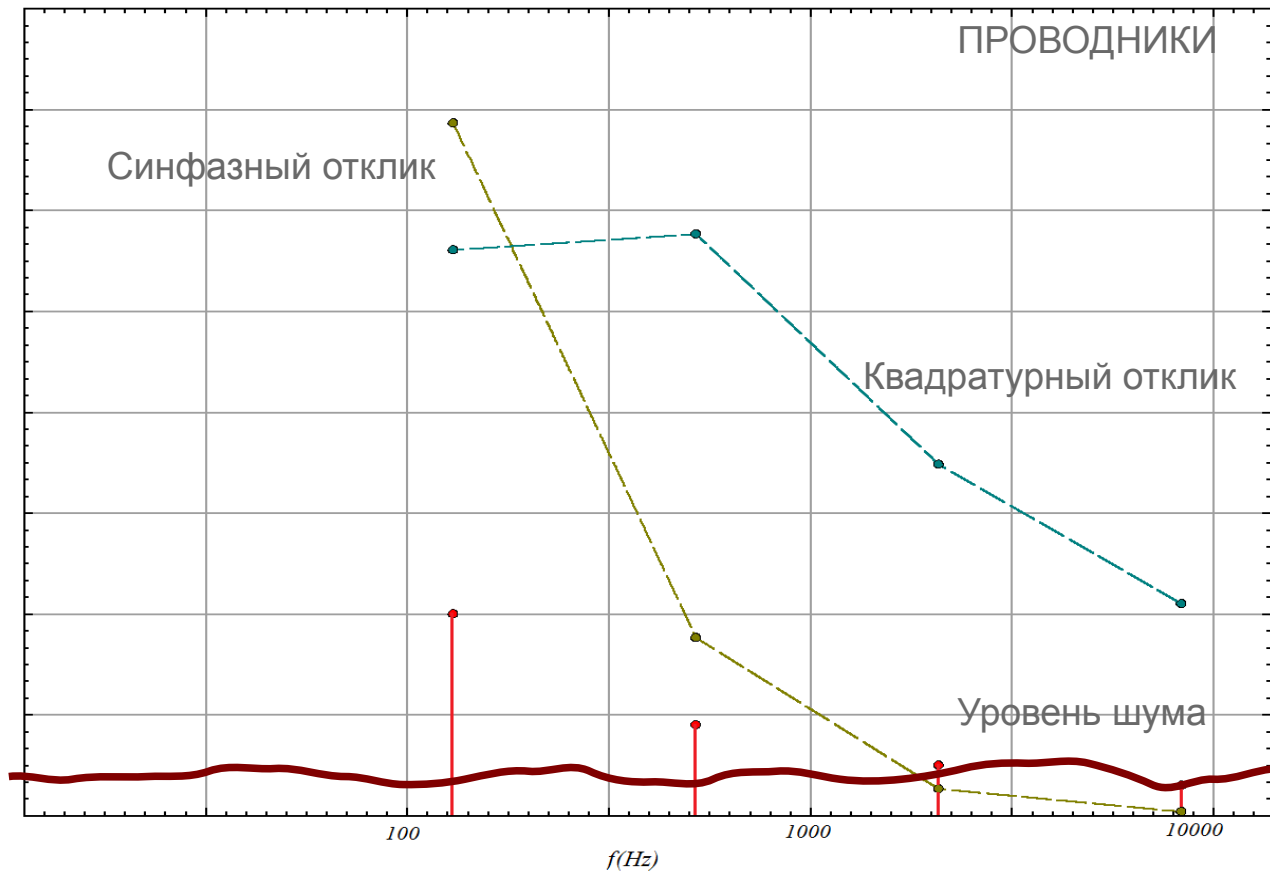


Особенности обработки сигналов

ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)



Спектральное представление

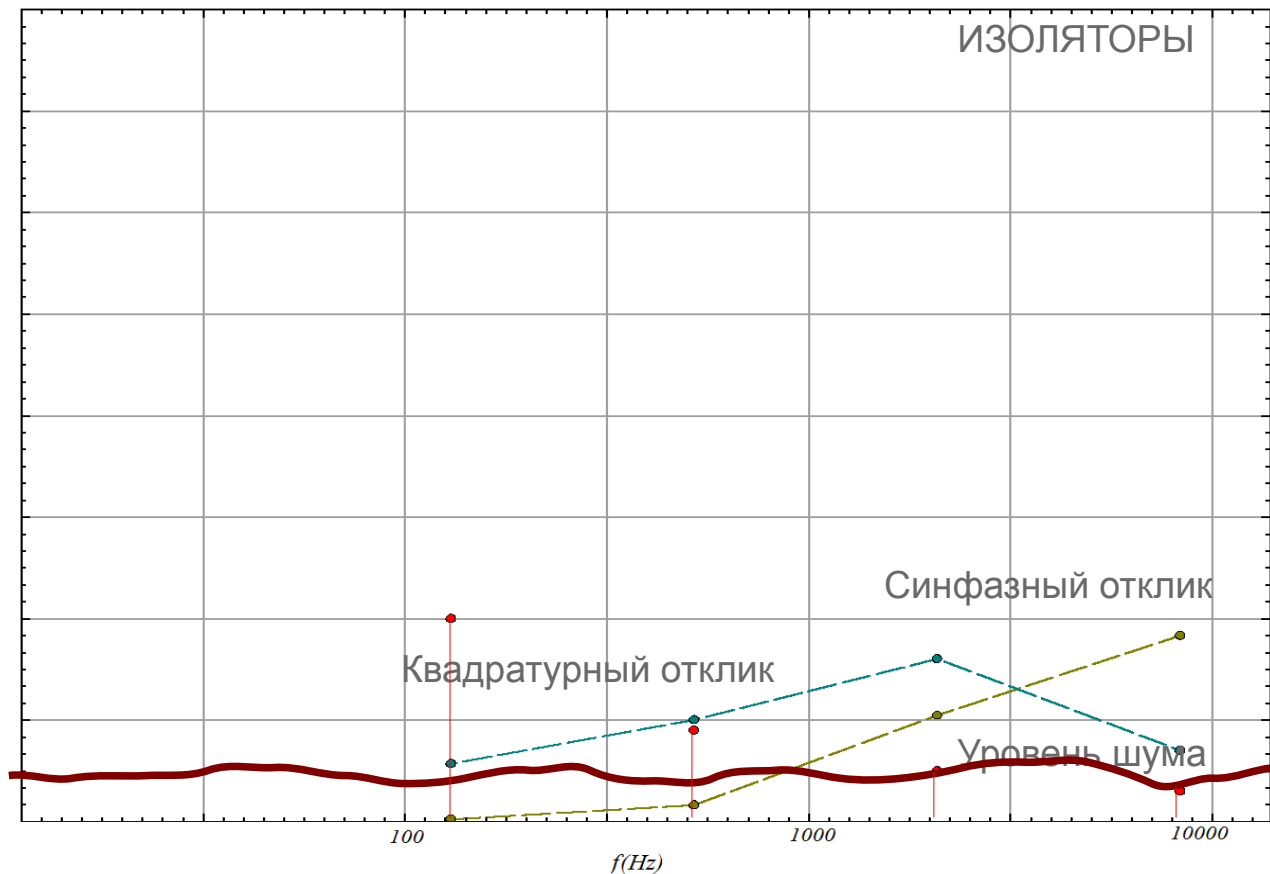


Особенности обработки сигналов



ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)

Спектральное представление



ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)

Стабилизация сигналов

$$A_P(t) = [\operatorname{Re}(A e^{i(\omega-\delta)t}) + \operatorname{Re}(A e^{i(\omega+\delta)t})]$$

Суммарный сигнал

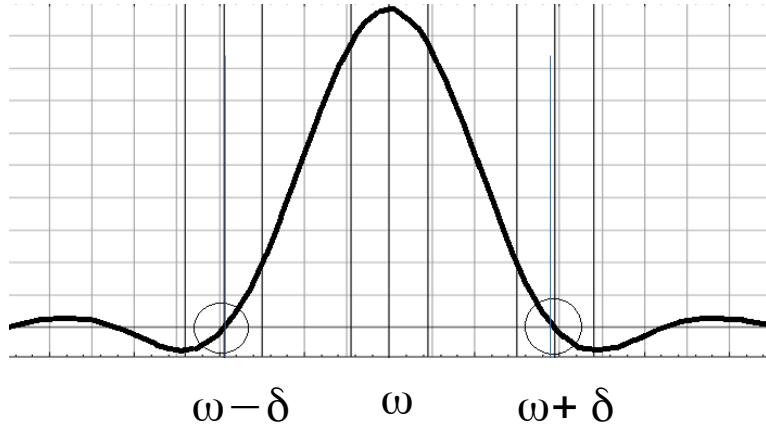
$$U(t) = [H(t) + \operatorname{Re}(A e^{i(\omega-\delta)t}) + \operatorname{Re}(A e^{i(\omega+\delta)t})]$$

Комплексные коэффициенты чувствительности измерительной системы

$$\check{\chi}(\omega) = \begin{pmatrix} \check{\chi}_{xx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \check{\chi}_{yy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \check{\chi}_{zz}(\omega) \end{pmatrix}$$

Коэффициент на частоте ω

$$\check{\chi}(\omega) \approx \frac{\check{\chi}(\omega-\delta) + \check{\chi}(\omega+\delta)}{2}$$



Детектирование триплета

$$\frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \check{\chi}(\omega) U(t) e^{i\omega t} dt = \check{A}_0 = \check{\chi}(\omega) \check{H}$$

$$\frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \check{\chi}(\omega+\delta) U(t) e^{i(\omega+\delta)t} dt = \check{A}_R = \check{\chi}(\omega+\delta) A$$

$$\frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \check{\chi}(\omega-\delta) U(t) e^{i(\omega-\delta)t} dt = \check{A}_L = \check{\chi}(\omega-\delta) A$$

Особенности обработки сигналов

ЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ (FREQUENCY DOMAIN)

Недостатки

- затруднен поиск рудных объектов в присутствии перекрывающих отложений
- большое влияние первичного поля и геометрических факторов
- меньшая чувствительность из-за необходимости измерять первичное поле
- мало частот в спектре возбуждения (по сравнению с временными системами)

Преимущества

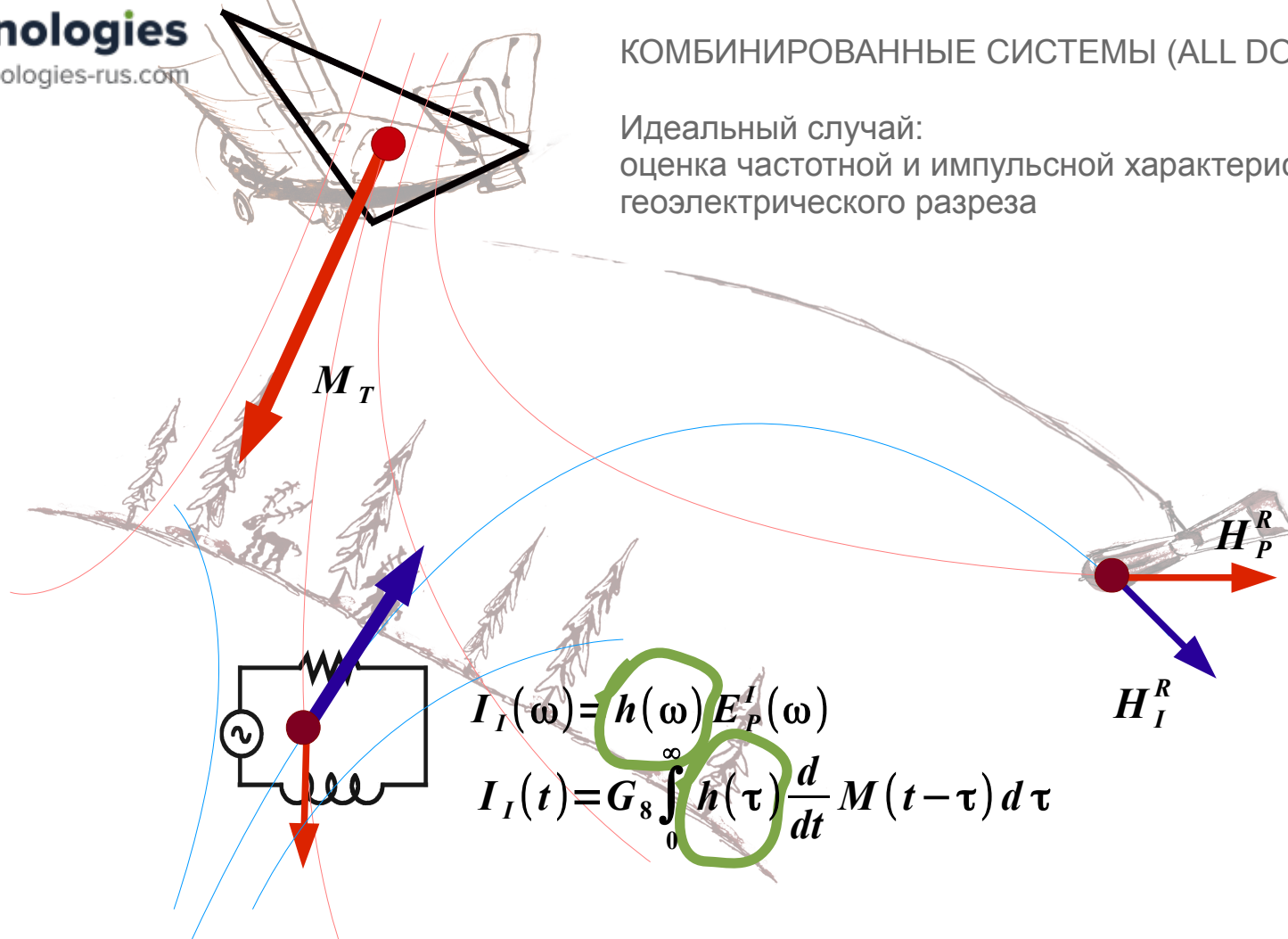
- высокая чувствительность к контрастам в высокоомных областях
- очень широкий частотный диапазон
- первичное поле надежно измеряется
- высокие частоты имеют большую амплитуду
- можно контролировать геометрию по параметрам поля
- можно контролировать стабильность



Особенности обработки сигналов

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ (ALL DOMAIN)

Идеальный случай:
оценка частотной и импульсной характеристик
геоэлектрического разреза



COTRAN

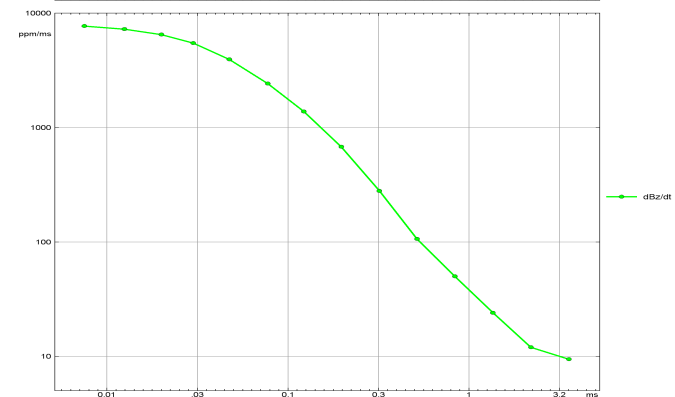
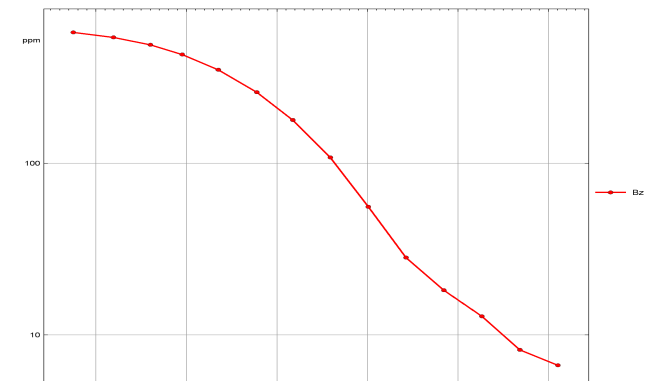
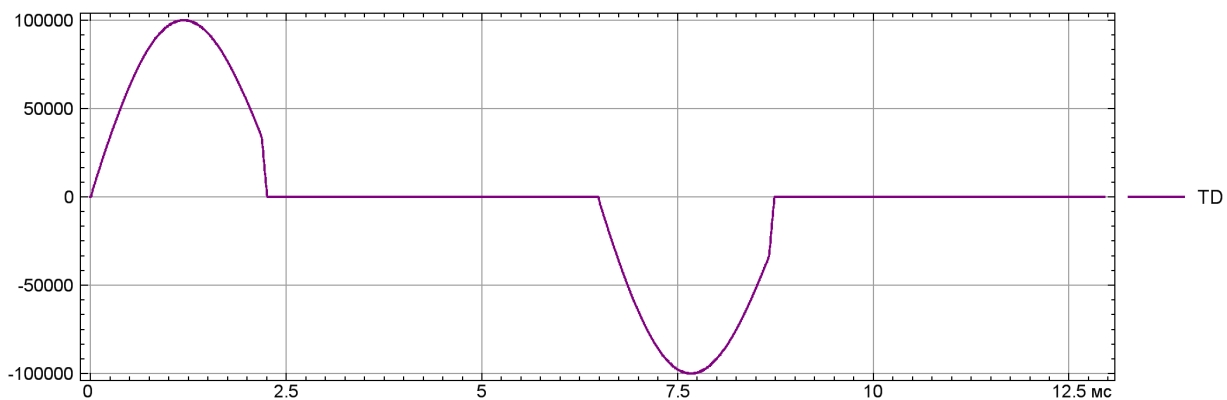
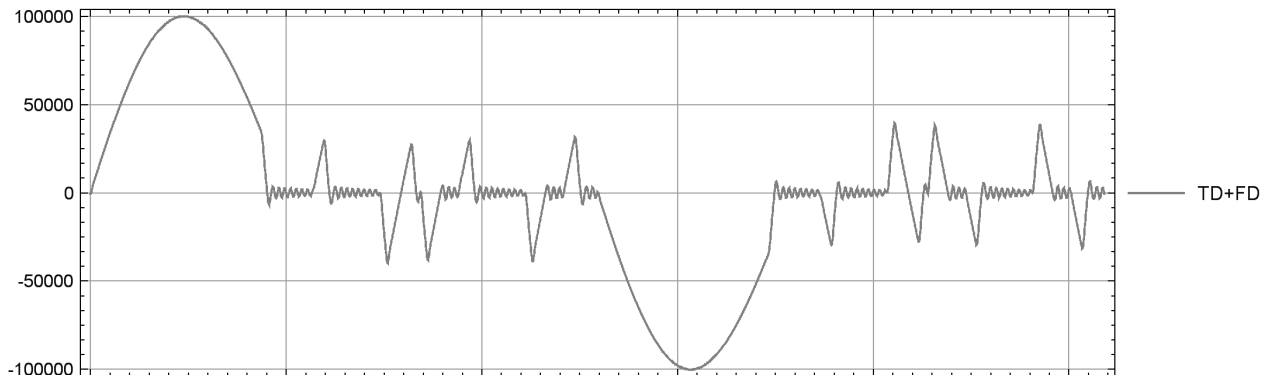
Легендарные системы



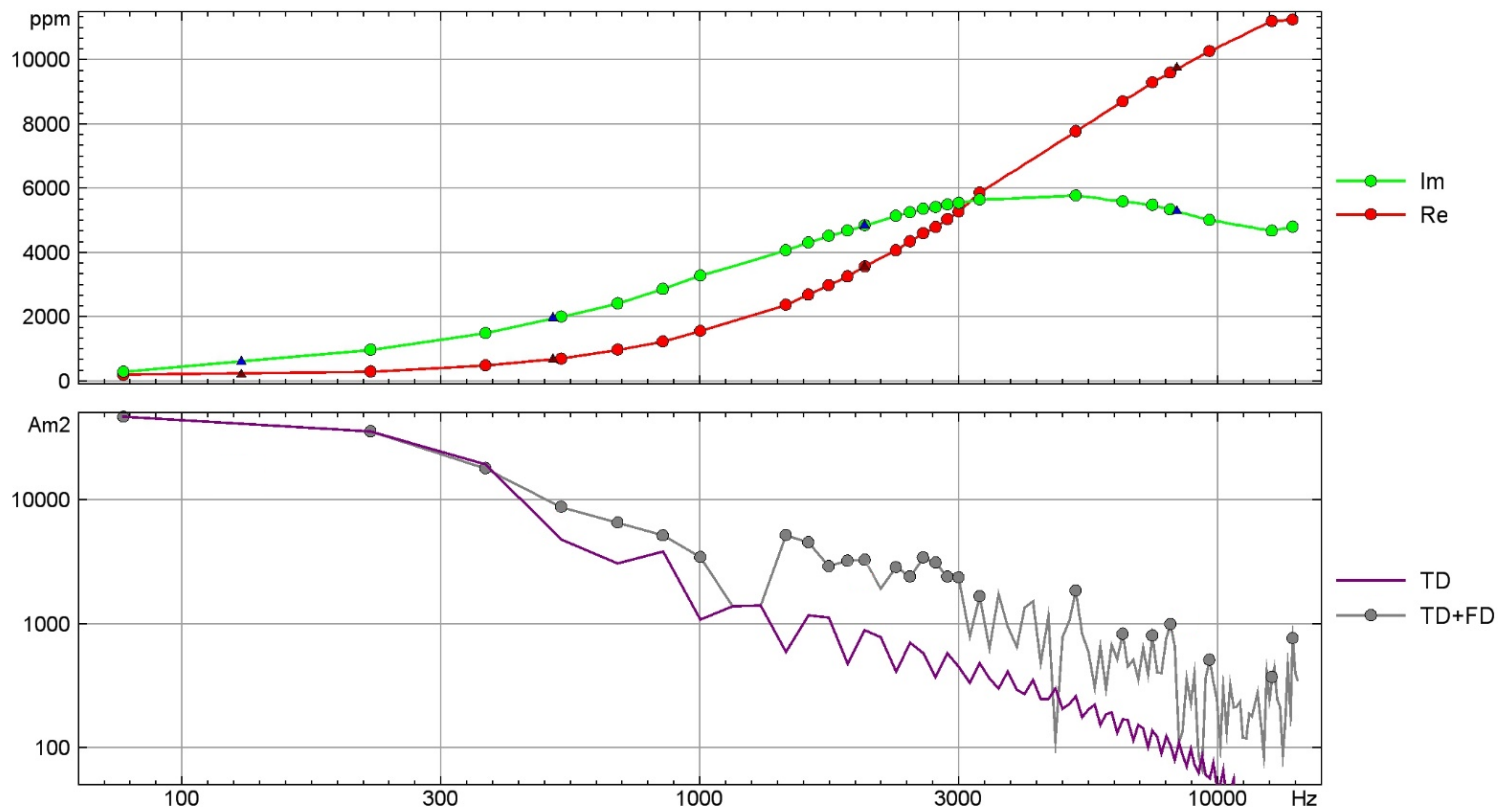
ЭКВАТОР



Временное представление



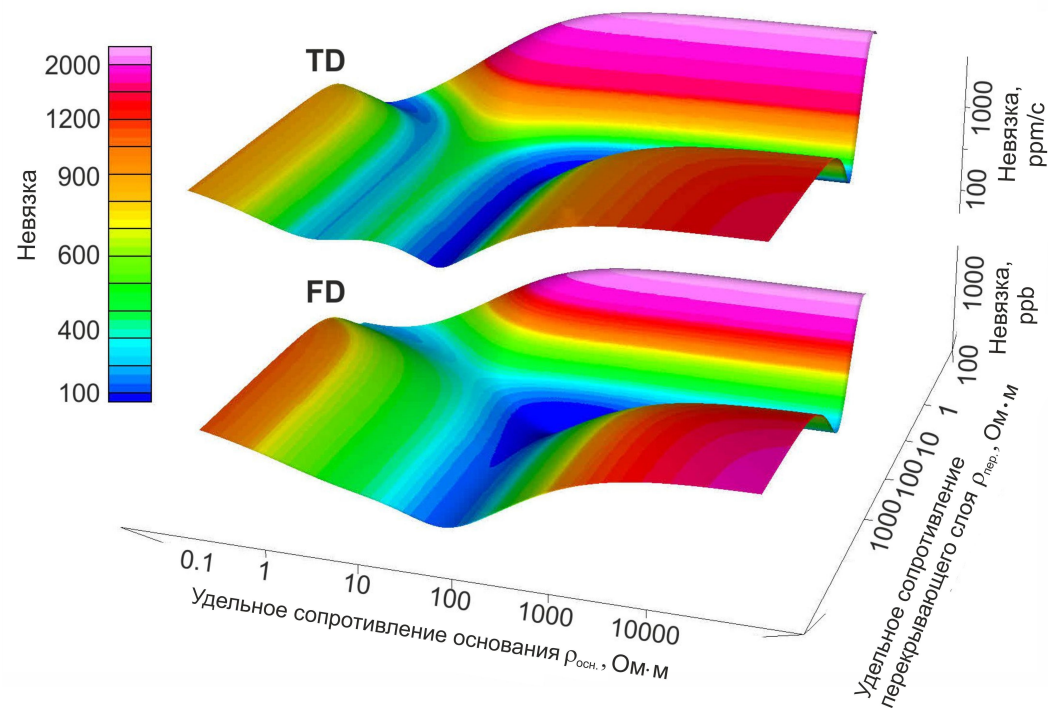
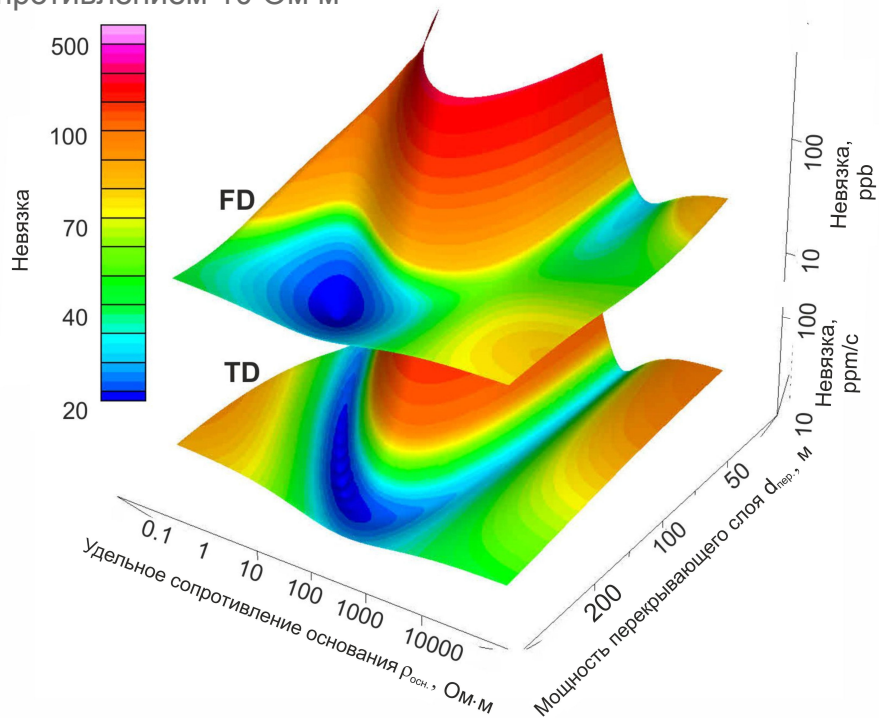
Спектральное представление



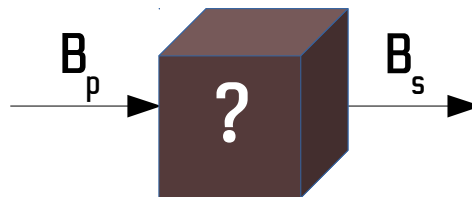
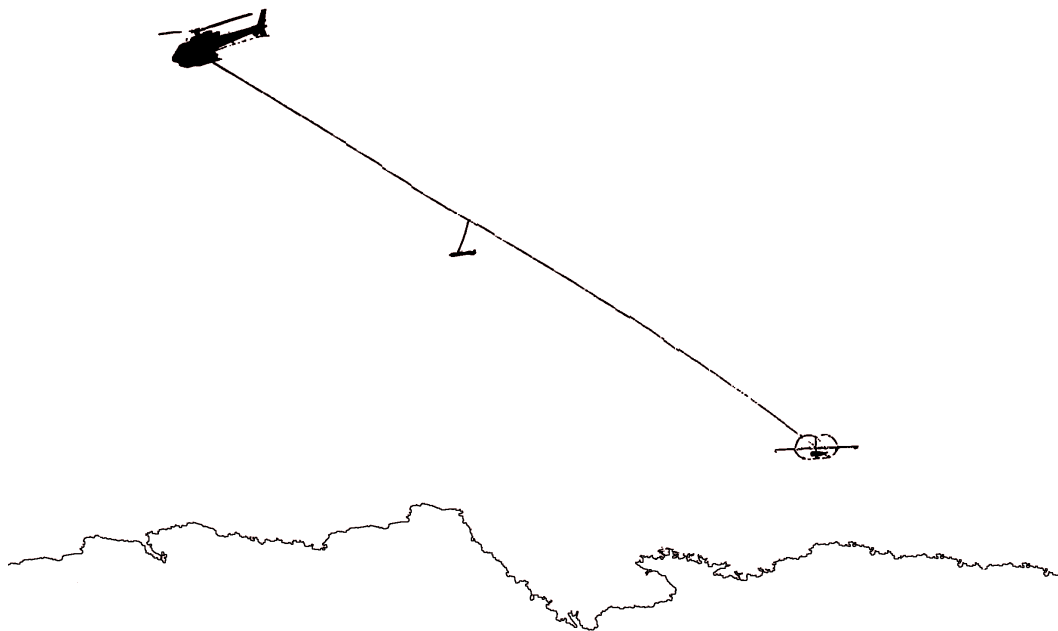
Обработка данных в частотной и временной области

перекрывающий слой с удельным сопротивлением 2000 Ом·м мощностью 200 м и основание с удельным сопротивлением 10 Ом·м

перекрывающий слой с удельным сопротивлением 100 Ом·м мощностью 20 м и основание 80 Ом·м



Эффект ИВП. Альтернативный подход



Chen, T., Smiarowski, A., and Hodges, G., 2015, Understanding airborne IP: First European Airborne Electromagnetic Conference, EAGE, Extended Abstracts.

Kaminskiy, V. and Viezzoli, A., 2017, Modelling induced polarisation effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies: Geophysics, 82(2), 1-13.

Kwan, K., Legault, J., Johnson, I., Prikhodko, A., and Plastow, G., 2018, Interpretation of Cole-Cole parameters derived from helicopter TDEM data – Case studies: SEG Annual Meeting and Exhibition, Anaheim, Extended Abstracts, 1-6.



$$\zeta(\omega) = \rho \left[1 - m_0 \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

Cole, K.S., and Cole, R.H., 1941, Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics: Journal of Chemical Physics, 9, 341-351.

Cole, K.S., and Cole, R.H., 1942, Dispersion and absorption in dielectrics II. Direct current characteristics: Journal of Chemical Physics, 10, 98-105.

Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, G., Sill, W.R., and Nelson, P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: Geophysics, 43(3), 588-609



Дисперсионная модель:

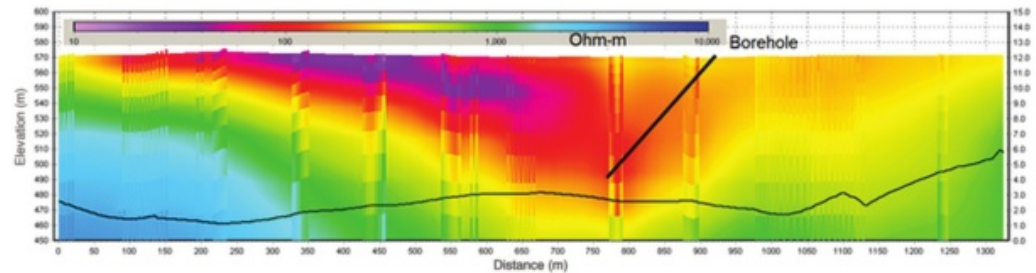
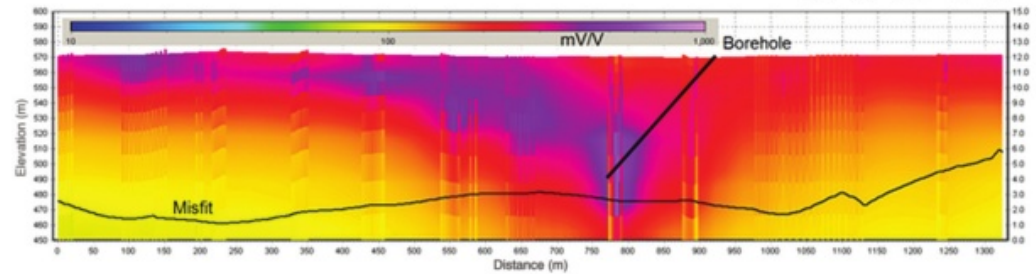
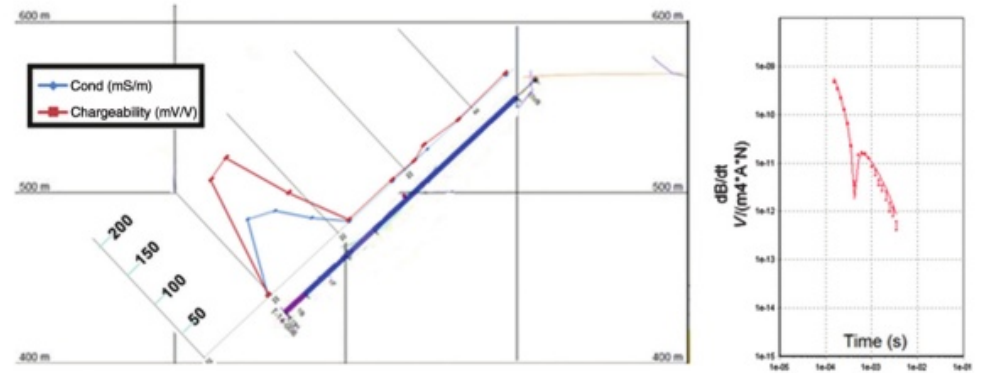
$$\frac{\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty} = 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \quad \text{или}$$

$$Z(\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

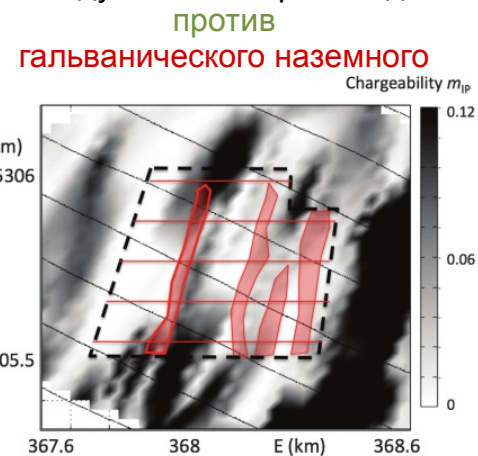
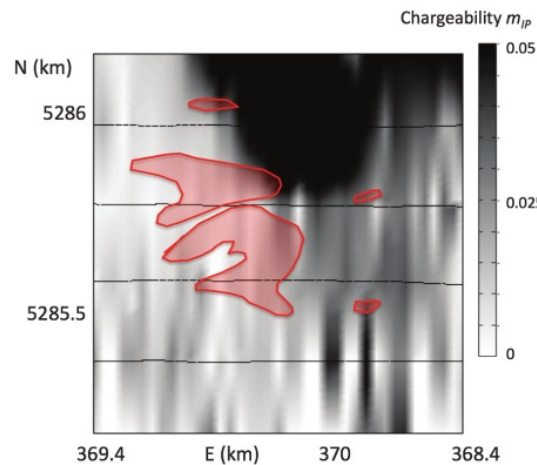
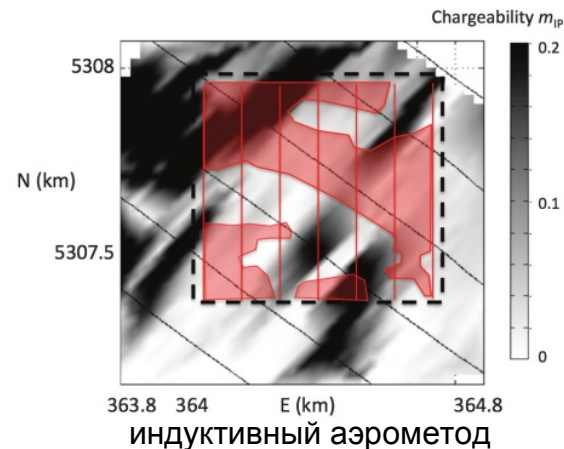
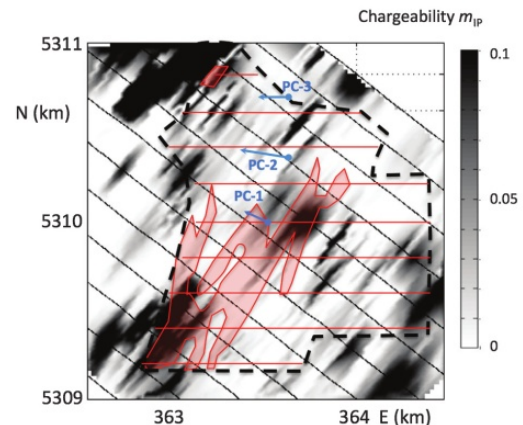
Современные подходы

Kaminskiy, V. and Viezzoli, A., 2017, Modelling induced polarisation effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies: Geophysics, 82(2), 1-13.

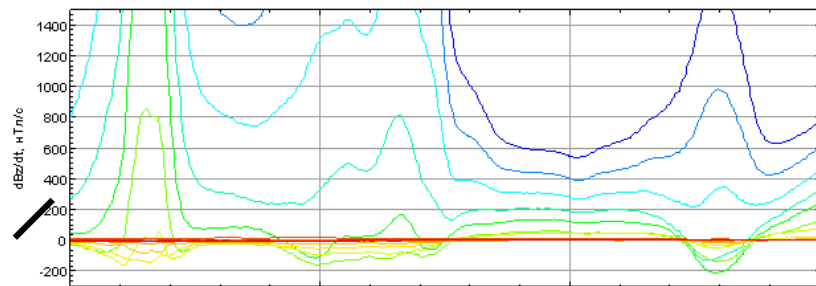
$$\zeta(\omega) = \rho \left[1 - m_0 \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$



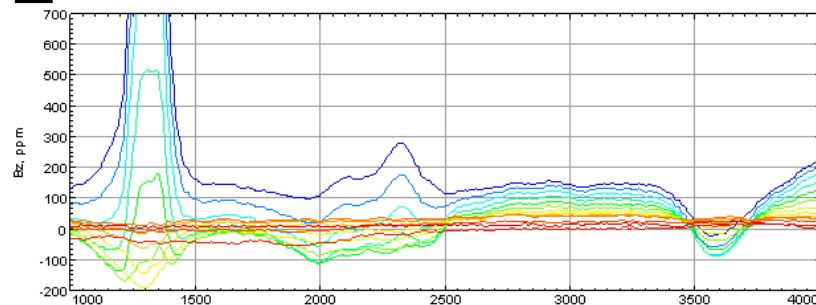
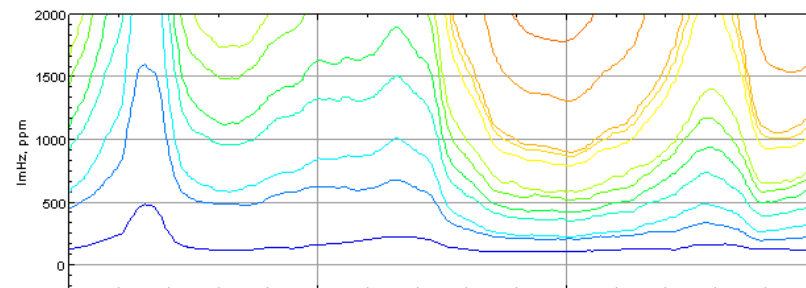
Macnae, J., and Hine, K., 2016, Comparing induced polarisation responses from airborne inductive and galvanic ground systems: Tasmania: Geophysics, 81(6), E471-E479.



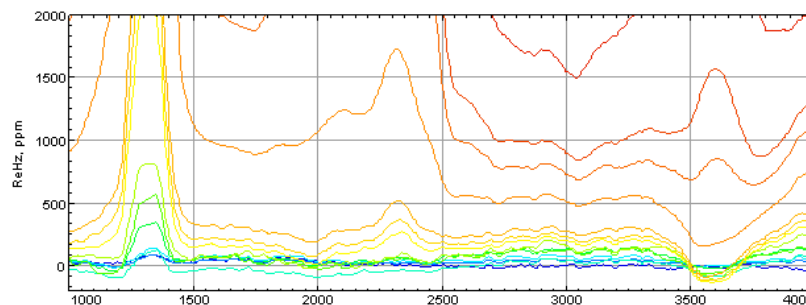
dB_z/dt



$Im B_z$



B_z

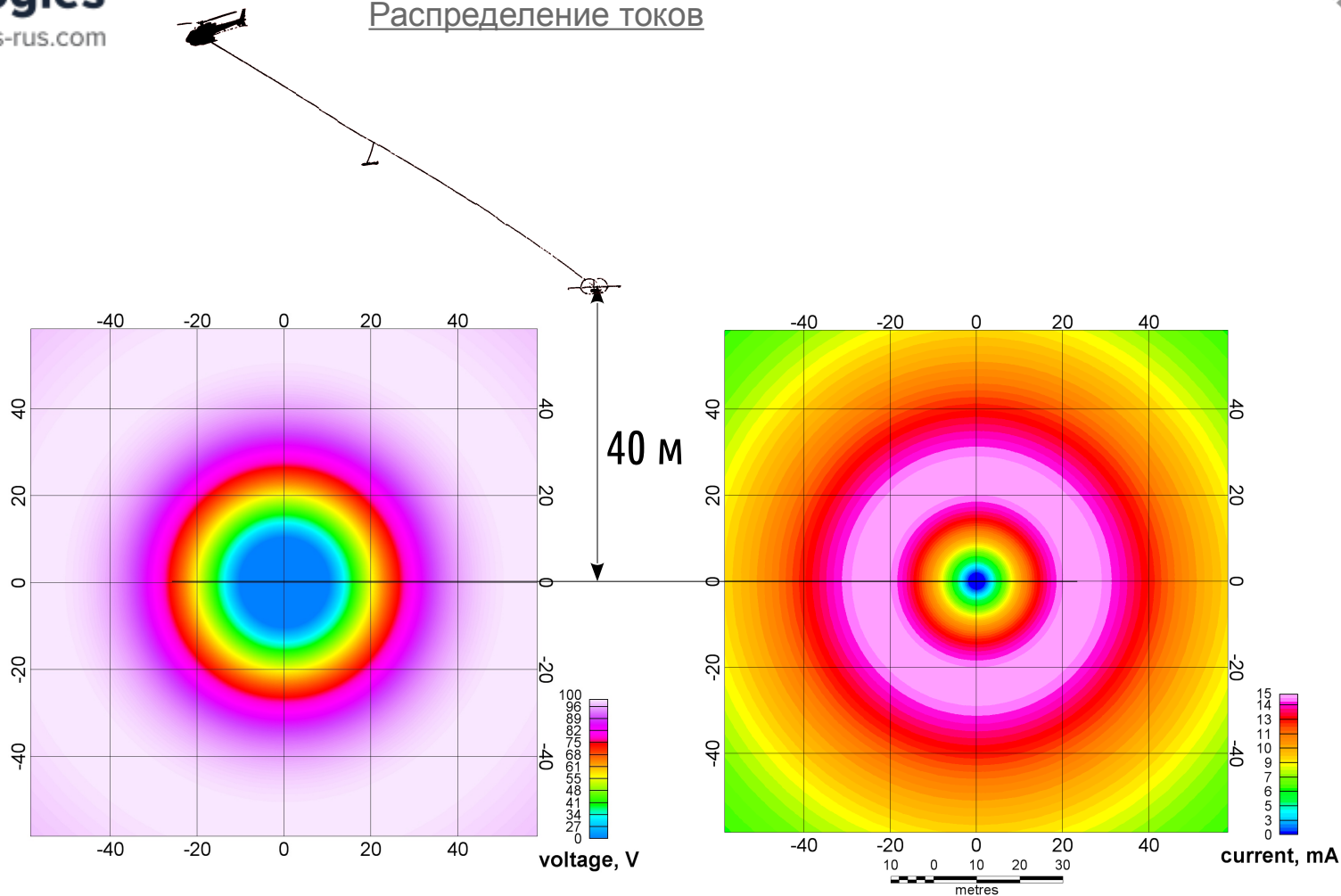


$Re B_z$



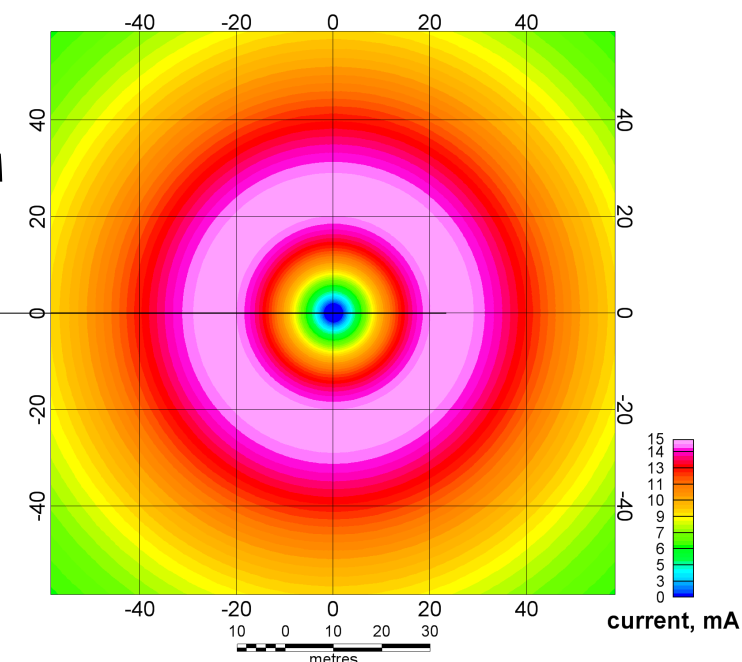
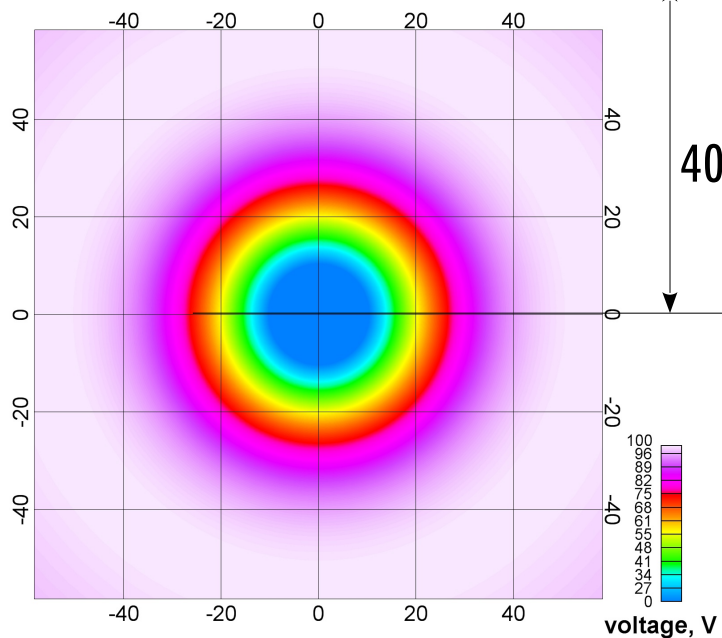
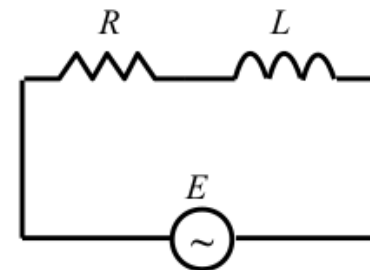
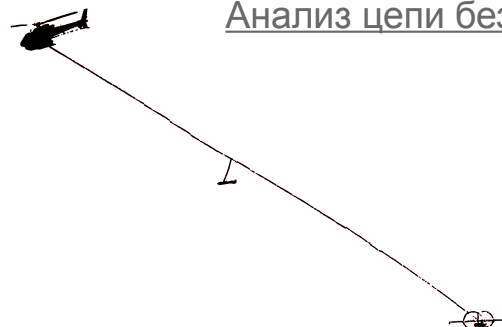
Эффект ИВП. Альтернативный подход

Распределение токов



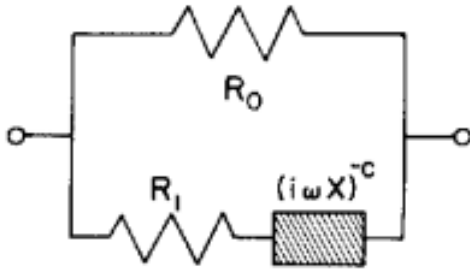
Эффект ИВП. Альтернативный подход

Анализ цепи без эффекта ИВП



Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, G., Sill, W.R., and Nelson, P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: Geophysics, 43(3), 588-609

Модель Cole-Cole



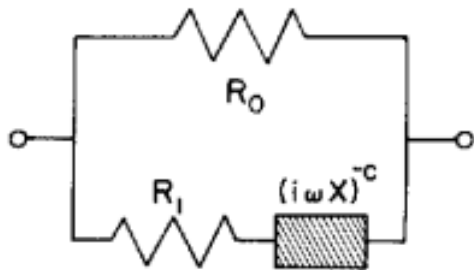
$$Z(\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

где

$$m = \frac{1}{1 + R_1/R_0}, \quad \tau = X \left(\frac{R_0}{m_0} \right)^{1/c}$$

Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, G., Sill, W.R., and Nelson, P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: Geophysics, 43(3), 588-609

Модель Cole-Cole



$$Z(\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

где

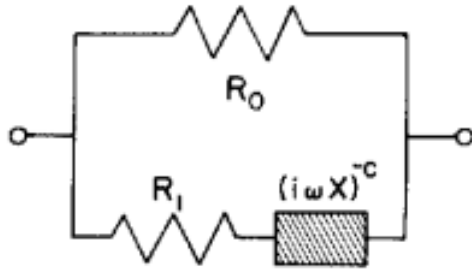
$$m = \frac{1}{1 + R_1/R_0}, \quad \tau = X \left(\frac{R_0}{m} \right)^{1/c}$$



Как разделить L и C в модели Cole-Cole?

Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, G., Sill, W.R., and Nelson, P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: Geophysics, 43(3), 588-609

Модель Cole-Cole



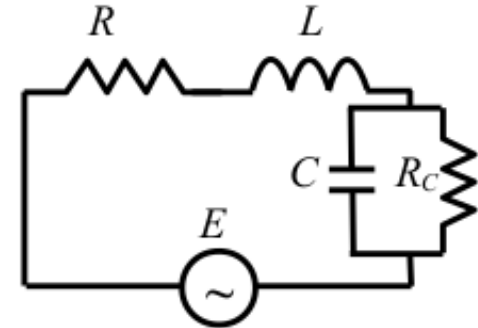
$$Z(\omega) = R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

где

$$m = \frac{1}{1 + R_1/R_0}, \quad \tau = X \left(\frac{R_0}{m_0} \right)^{1/c}$$



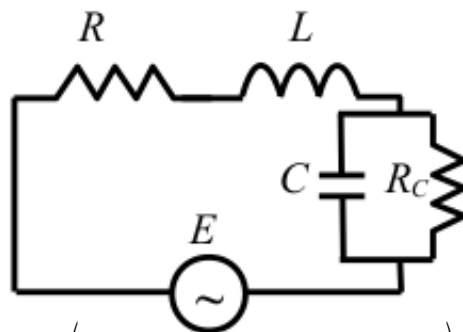
BylernbdyfzМодель



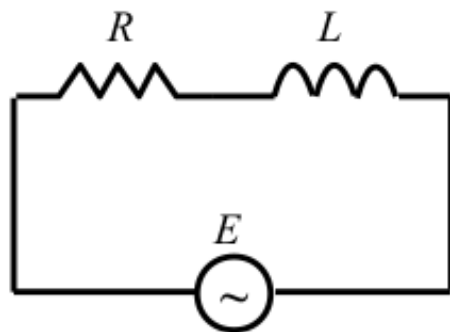
Как разделить L и C в модели Cole-Cole?

Анализ цепи с эффектом ИВП

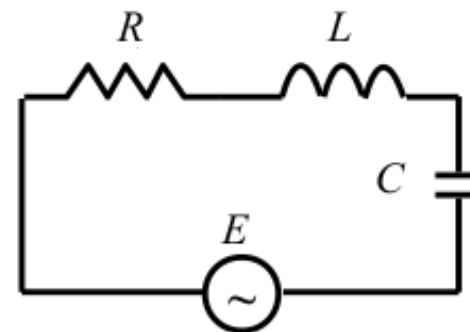
Индуктивная модель



$$E = I \left(R + i \omega L - \frac{i R_C}{\omega R_C C - i} \right)$$



$$E = I (R + i \omega L)$$



$$E = I \left(R + i \omega L - \frac{i}{\omega C} \right)$$

Эффект ИВП. Альтернативный подход

Анализ цепи с эффектом ИВП

Асимптотическая индуктивная модель

$$E = I \left(R + i \omega L - \frac{i}{\omega C} \right) \Rightarrow \frac{E \bar{I}}{I^2} = \left(R + i \omega L - \frac{i}{\omega C} \right)$$

Закон Фарадея: $E \sim S \cdot i \omega B_p$ (первичное поле)

Закон Ампера: $B_s \sim S \cdot I$ (вторичное поле)

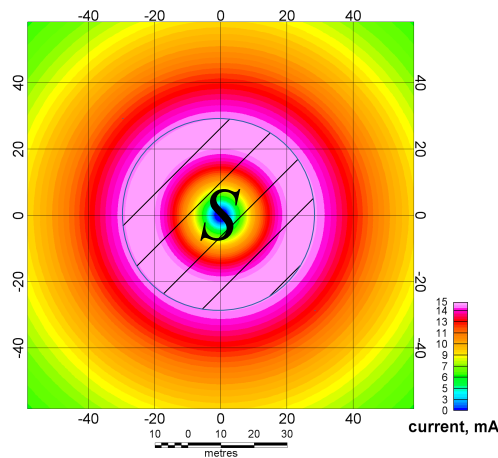
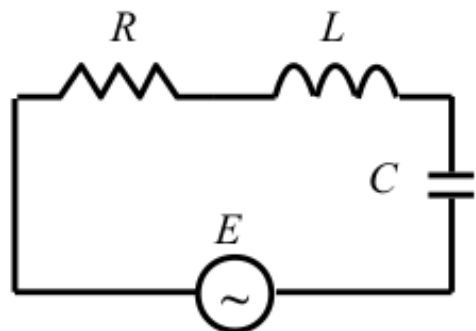
$$\frac{k \omega B_p}{B_s^2} (i \operatorname{Re} B_s + \operatorname{Im} B_s) = \left(R + i \omega L - \frac{i}{\omega C} \right),$$

Действительная часть:

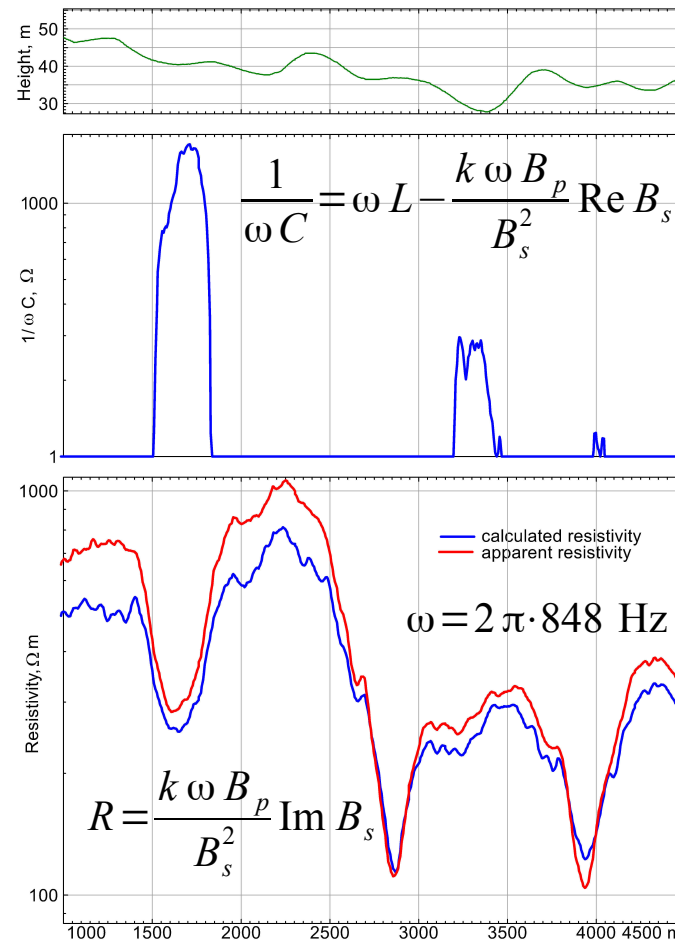
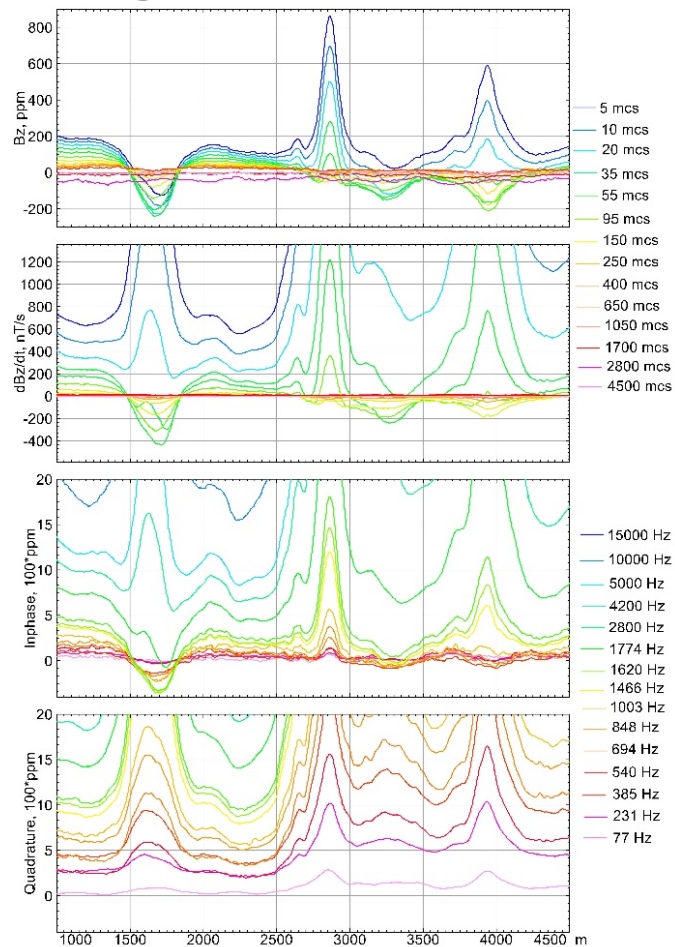
$$R = \frac{k \omega B_p}{B_s^2} \operatorname{Im} B_s.$$

Мнимая часть:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L - \frac{k \omega B_p}{B_s^2} \operatorname{Re} B_s.$$

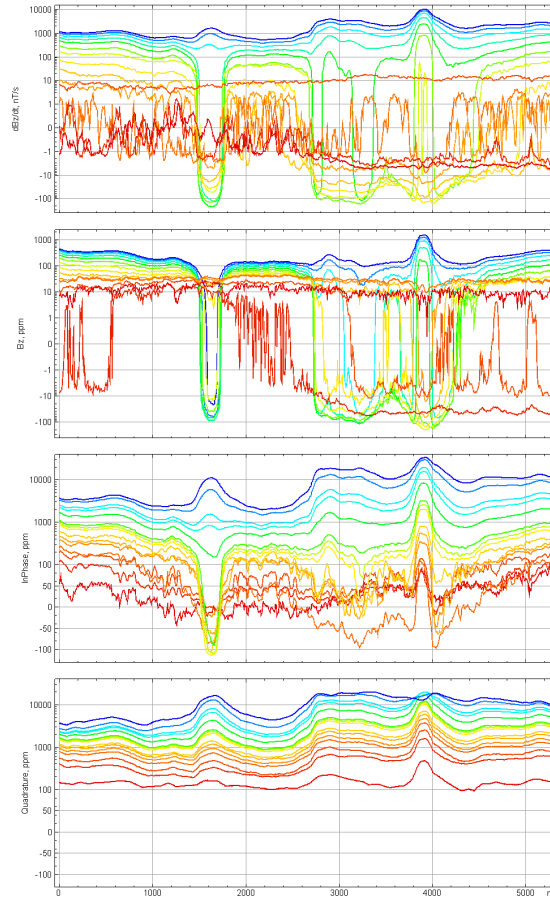


Пример: Якутия



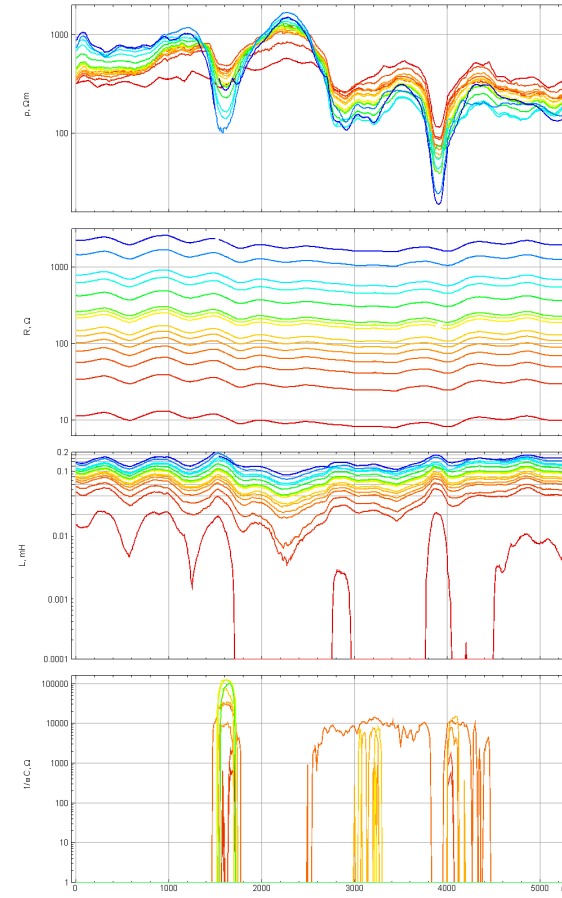
Эффект ИВП. Альтернативный подход

Пример: Якутия

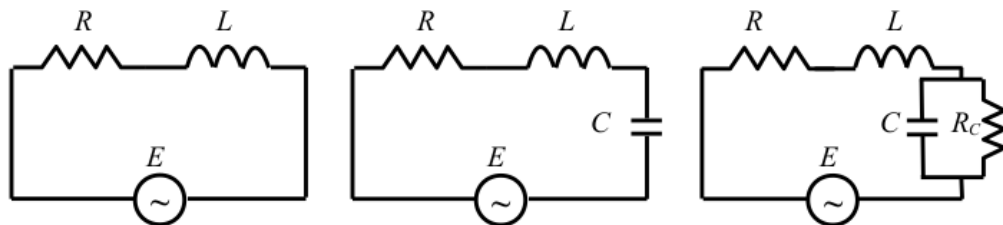
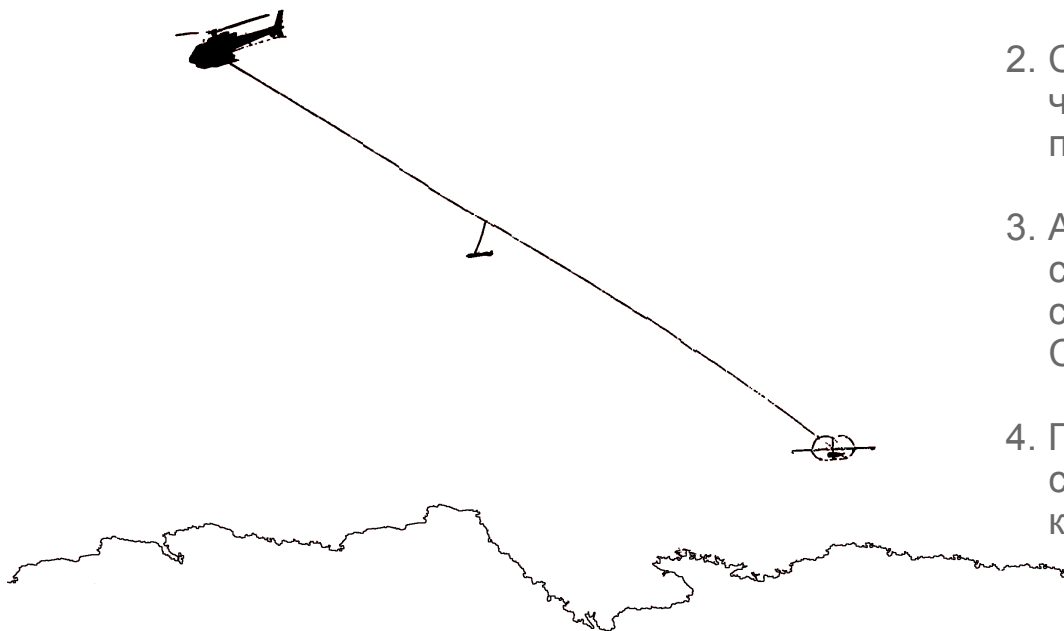


- 5 mcs
- 10 mcs
- 20 mcs
- 35 mcs
- 55 mcs
- 95 mcs
- 150 mcs
- 250 mcs
- 400 mcs
- 650 mcs
- 1050 mcs
- 1700 mcs
- 2800 mcs
- 4500 mcs

- 15000 Hz
- 10000 Hz
- 5000 Hz
- 4200 Hz
- 2800 Hz
- 1774 Hz
- 1620 Hz
- 1466 Hz
- 1003 Hz
- 848 Hz
- 694 Hz
- 540 Hz
- 385 Hz
- 231 Hz
- 77 Hz



1. За комбинированными системами — будущее
2. Совместная интерпретация во временной и в частотной области дает определенные преимущества
3. Анализ ИВП в частотной области в ряде случаев позволяет получить оценку сопротивлений без применения модели Cole-Cole
4. Примеры показывают, что кажущееся сопротивление, вычисленное по квадратурным компонентам слабо подвержено эффекту ИВП



Smith, R.S., Volkovitsky, A.K. Airborne Electromagnetic Prospecting Systems / Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. Amsterdam: Elsevier B.V., 2014. P. 679-710.

Volkovitsky, A., Karshakov, E. Airborne EM Systems Variety: what is the Difference? / Papers of the 13th SAGA Biennial and 6th International AEM Conference, Mpumalanga, South Africa: AEM, 2013. P. 1-4.

Волковицкий, А.К., Каршаков, Е.В., Попович, В.В. Компенсация влияния наведенных токов в низкочастотной индуктивной аэроэлектроразведочной системе EM-4H / . Екатеринбург: -, 2008. С. 40-43.

Karshakov, E., Volkovitsky, A., Tkhorenko, M. Receiver Positioning by Means of EM Field Measurements / Papers of the 13th SAGA Biennial and 6th International AEM Conference, Mpumalanga, South Africa: AEM, 2013. P. 1-4.

Karshakov, E., Moilanen, J. Combined interpretation of time domain and frequency domain data / Proceedings of the 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics, Kolding, Denmark: Aarhus University, 2018. P. 1-3.

Karshakov, E., Moilanen, J. Overcoming Airborne IP in Frequency Domain: Hopes and Disappointments / Extended Abstracts of the 16 th SAGA Biennial Conference & Exhibition, Durban, South Africa: SAGA, 2019. P. 1-4.

