

Совместный семинар ЦКП ССКЦ и НГУ «Высокопроизводительные вычисления»

# **Трёхмерное моделирование сигналов российских зондов электрокаротажа в вертикальных и наклонно- горизонтальных нефтегазовых скважинах**

О.П. Темирбулатов, И.В. Михайлов, И.В. Суродина  
(НГУ, ИНГГ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН)

Новосибирск, 6 апреля 2023

# Цели и задачи

## Цели:

1. Выявление зависимости сигналов электромагнитного каротажного зонда с тороидальными катушками от параметров геоэлектрических моделей (угол наклона скважины, контраст УЭС на границах, толщина продуктивного пласта).
2. Сравнение глубин обнаружения соседнего пласта и влияния вмещающих толщ по данным российских зондов электрокаротажа

## Задачи:

1. Проведение численного трехмерного конечно-разностного моделирования сигналов российских зондов электрокаротажа с использованием ресурсов ЦКП ССКЦ СО РАН
2. Анализ и обобщение результатов моделирования

# Актуальность

- Развитие средств решения прямой задачи в области скважинной геофизики (ранее не моделировались поля от тороидальных источников в трехмерной постановке)
- Развитие отечественных решений в области каротажа (импортозамещение)

## Использованные ресурсы ЦКП ССКЦ

- **НКС-30Т** (моделирование сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа и бокового каротажного зондирования)
- **НКС-1П** (моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками)

# Российские зонды электрокаротажа

- Боковое каротажное зондирование (БКЗ)
- Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ)
- Электромагнитный зонд с тороидальными катушками (ЗЭТ)

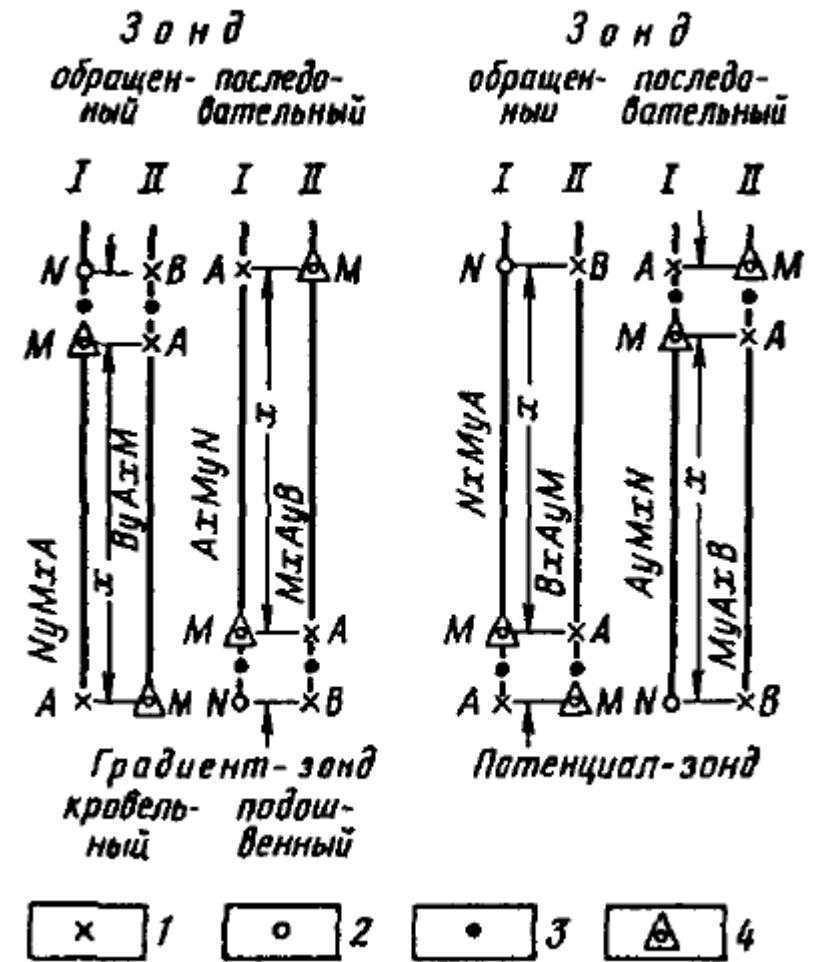
# Боковое каротажное зондирование (БКЗ)

- Измерение кажущегося сопротивления с помощью пяти-семи градиент-зондов (реже потенциал-зондов) различной длины.
- Состоит из трех электродов, четвертый размещается на поверхности. Электроды А и В – питающие электроды, электроды М и N – измерительные электроды. При перемещении зонда вдоль скважины измеряется разность потенциалов между М и N. Далее из разности потенциалов рассчитывается кажущееся сопротивление.

$$\rho_{\text{каж}} = K \frac{\Delta U}{I},$$

где  $\rho_{\text{каж}}$  – кажущееся сопротивление, Ом·м; K – коэффициент зонда (зависит от его конфигурации), м;  $\Delta U$  – разность потенциалов между электродами М и N, мВ; I – сила питающего тока, мА.

- Метод БКЗ успешно применяется для изучения мощных пластов плотных и пористых пород, а также при изучении отдельных плотных и пористых тонких пластов.



Зонды для измерения кажущегося сопротивления горных пород. Зонды I – прямого питания (однополюсный), II – взаимного питания (двуполюсный), Электроды 1 – питающие (А, В), 2 – измерительные (М, N), 3 – точка записи кажущегося сопротивления, 4 – точка записи СП (Добрынин В. М., 2004)

# Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ)

Измеряется разность фаз  $\Delta\varphi$  между ЭДС, наведенными в измерительных катушках в каждом из пяти трехкатушечных электродинамически подобных зондов. Магнитное поле распространяется в проводящей среде от источника излучения до приемников. Разность фаз  $\Delta\varphi$  определяется пространственным распределением УЭС среды, характеризует УЭС пород и неоднородности прискважинной зоны:

$$\Delta\varphi = p_1 \delta L_1 - \operatorname{arctg} \frac{p_1 \delta L_1}{1 + p_1(2 - \delta L_1) + 2p_1^2(1 - \delta L_1)},$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\rho}} L_1, \quad \Delta L = L_1 - L_2, \quad \delta L_1 = \frac{\Delta L}{L_1},$$

где  $f$  – частота,  $\rho$  – УЭС пласта,  $L_1$  – длина зонда,  $\Delta L$  – расстояние между приемными катушками,  $\mu = \mu_0 \mu^*$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_{\text{Н}}}{\text{м}}$ ,  $\mu^*$  – относительная магнитная проницаемость.

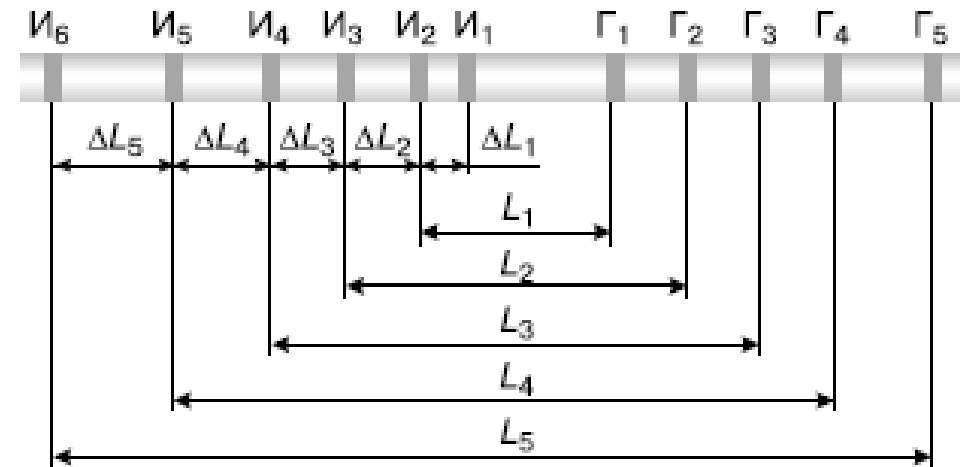


Схема пятизондового прибора ВИКИЗ  
(Технология исследования..., 2000)

# Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ)

## Решаемые методом ВИКИЗ задачи:

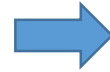
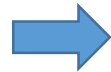
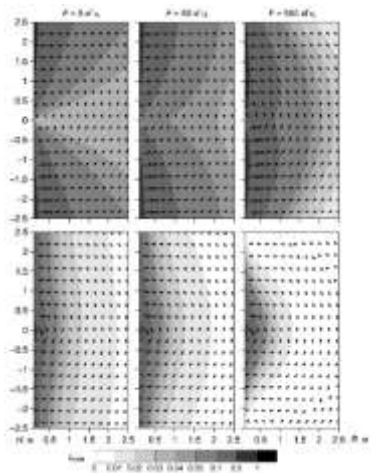
1. Расчленение разреза (в т.ч. тонкослоистого) с высоким пространственным разрешением;
2. Выявление водонефтяных и газоводяных контактов;
3. Определение УЭС неизменной части пласта, зоны проникновения и оценка глубины вытеснения пластовых флюидов;
4. Выделение и оценка параметров радиальных неоднородностей в области проникновения, в т.ч. скоплений соленой воды (окаймляющие зоны), как прямого качественного признака присутствия подвижных углеводородов в коллекторах.

**Диаграммы ВИКИЗ**, в комплексе с данными других методов ГИС и петрофизической информацией, **позволяют** :

- определять коэффициент нефтегазонасыщения;
- расчленять терригенный разрез по литологическому признаку;
- оценивать неоднородность свойств коллекторов;
- выделять пласты уплотненных песчаников с карбонатным или силикатным цементом и пр.

# Цикл работ над ЗЭТ

В ИНГГ СО РАН и НПП ГА «Луч» проведён полный цикл научно-исследовательских работ по ЗЭТ: от теоретического обоснования до опытно-промышленных испытаний в Самарской области. Было получено 6 патентов РФ.



Математическое обоснование.  
Создание программного обеспечения.  
Масштабное численное моделирование.

Измерения в баке  
с электролитом.

Испытания в водоёмах  
(Новосибирское  
водохранилище).

Опытно-  
промышленные  
испытания в  
Самарской области.



# Схема и параметры электромагнитного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ

**ЗЭТ состоит из:**

- двух генераторных и трёх измерительных катушек;
- металлического немагнитного корпуса.

Имеются датчики тока на корпусе прибора.

Высокая удельная электропроводность металла обуславливает значительную плотность поверхностного тока даже при незначительных моментах генераторных катушек.

Частоты: 50, 100 и 250 кГц.

Расстояния между всеми соседними катушками = 0.25 м.

*Фото ЗЭТ*



# Режимы работы ЗЭТ

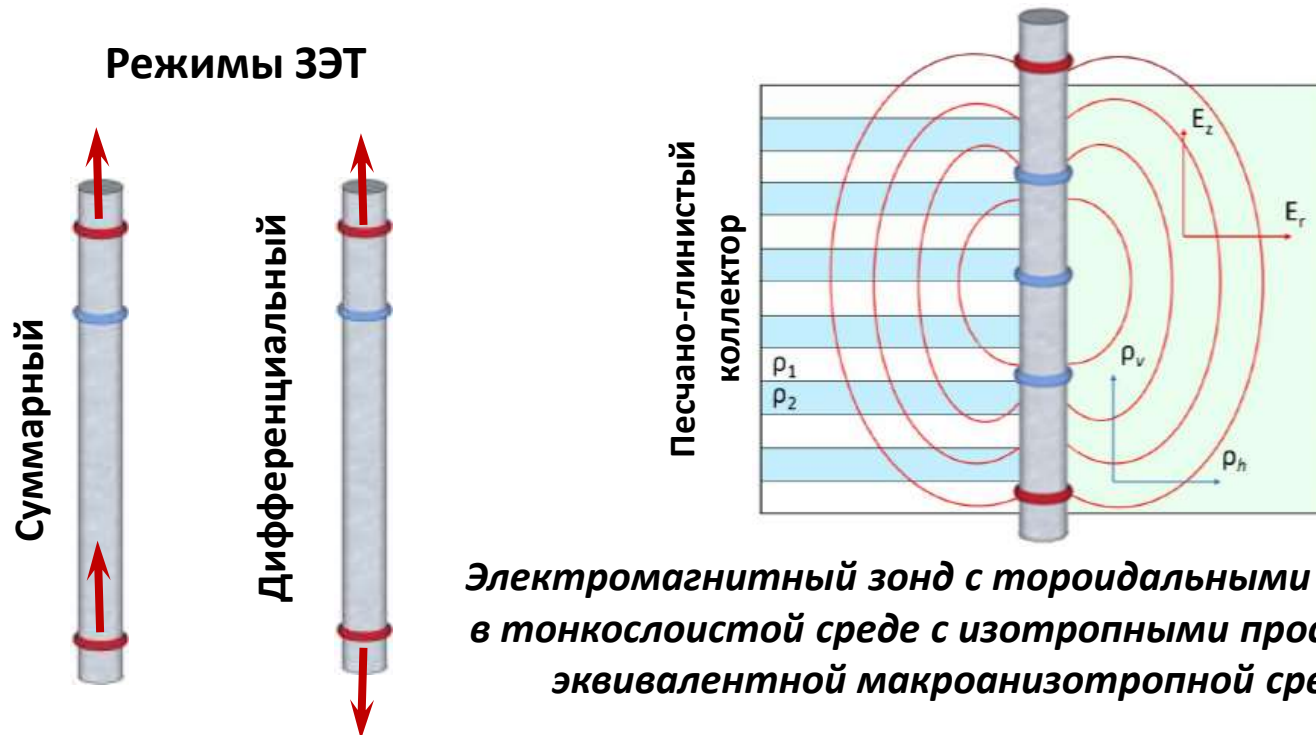
Реализованы два режима возбуждения-наблюдения сигналов:

- **Суммарный** (токи в генераторных катушках равны и сонаправлены).
- **Дифференциальный** (токи равны, но имеют разный знак).

**Суммарный** режим нацелен на определение:

- $\rho$  (пространственное распределение УЭС).
- $\lambda$  (коэффициент анизотропии).

**Дифференциальный** режим нацелен на определение **границ и зон трещиноватости**.



*Электромагнитный зонд с тороидальными катушками ЗЭТ в тонкослоистой среде с изотропными прослоями (слева) и эквивалентной макроанизотропной среде (справа)*

- В горных породах вокруг скважины возбуждается переменное электрическое поле **E**, имеющее горизонтальную ( $E_r$ ) и вертикальную ( $E_z$ ) компоненты;
- это обуславливает зависимость измеряемых ЗЭТ сигналов от горизонтального ( $\rho_h$ ) и вертикального ( $\rho_v$ ) УЭС пласта.

**Анализируемые сигналы:**

- реальная и мнимая части  $E_z$ ,  $H_\phi$ .

# Численное моделирование откликов зондов бокового каротажного зондирования

Прямая задача моделирования показаний зондов БКЗ сводится к моделированию поля точечного источника в среде с известным распределением электропроводности:

$$\sigma(x, y, z) = \frac{1}{\rho(x, y, z)},$$

которое описывается уравнением Пуассона.

В цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  данное уравнение для аномального потенциала электрического поля  $U^a$  принимает вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial U^a}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma \frac{\partial U^a}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial U^a}{\partial z} \right) = \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( (\sigma_0 - \sigma) r \frac{\partial U^0}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( (\sigma_0 - \sigma) \frac{\partial U^0}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\sigma_0 - \sigma) \frac{\partial U^0}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U = U^0 + U^a$ ,

$U$  – полный потенциал электрического поля,

$U^0 = \frac{I}{4\pi\sigma_0 R}$  - потенциал точечного источника, находящегося в однородной среде на вертикальной оси в точке  $z = 0$ ,

$U^a$  - аномальный потенциал,

$I$  – сила тока,

$R = \sqrt{r^2 + z^2}$ .

# Численное моделирование откликов зондов бокового каротажного зондирования

При удалении от источника потенциал затухает как  $1/R$ , поэтому для функции  $U^a$  вдали от источников:

$$U^a|_{r=R} = 0, U^a|_{z=\pm Z} = 0.$$

Потребуем также выполнения условия периодичности и ограниченности решения на оси  $Z$ :

$$U^a|_{\varphi=0} = 0, U^a|_{\varphi=2\pi} = 0$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial U}{\partial r} = 0.$$

Дискретизация уравнения (1) конечно-разностным методом на неравномерной сетке и последующая его симметризация приводит к системе линейных алгебраических уравнений:

$$Ax = b$$

где  $A$  – действительная, симметричная, сильно разреженная, положительно определенная матрица. Полученная система решается методом сопряженных градиентов с оригинальным предобуславливателем, полностью параллельным в реализации на графических процессорах. Для одного положения прибора рассчитываются показания для всех зондов одновременно, на одной сетке [Суродина, 2015]

# Численное моделирование сигналов ВИКИЗ (ВЭМКЗ)

Численное моделирование сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа сводится к решению векторного уравнения Гельмгольца:

$$-\Delta^2 \vec{E}^a + \vec{E}^a (i\omega\varepsilon - \sigma)i\omega\mu = \vec{E}^0 (\sigma - \sigma_0 - i\omega\varepsilon)i\omega\mu \quad (2)$$

Здесь  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  - магнитная проницаемость,

$\omega$  - циклическая частота,

$\varepsilon(x, y, z)$  - диэлектрическая проницаемость,

$\sigma(x, y, z)$  - электропроводность,

$\sigma_0(x, y, z)$  - электропроводность в однородной среде,

$\vec{j}$  - источник стороннего тока (плотность тока),

$\vec{E}^a = (E_x^a, E_y^a, E_z^a)$  - вектор аномального электрического поля в декартовой системе координат (ось  $Z$  совпадает с осью зонда и направлена вниз).

В качестве источника мы рассматриваем магнитный диполь, расположенный в начале координат с моментом  $\vec{M} = \{0, 0, M_z\}$ , направленным вдоль оси  $Z$ .

# Численное моделирование сигналов ВИКИЗ (ВЭМКЗ)

Компоненты электрического поля  $E_x^0, E_y^0, E_z^0$  в однородной среде описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} E_x^0 &= -\frac{i\omega\mu M_z}{4\pi R^2} \cdot \frac{y}{R} (1 + k_0 R) e^{-k_0 R} \\ E_y^0 &= \frac{i\omega\mu M_z}{4\pi R^2} \cdot \frac{x}{R} (1 + k_0 R) e^{-k_0 R} \\ E_z^0 &= 0 \end{aligned}$$

Здесь  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $k_0^2 = -i\omega\mu\sigma_0$

В рассматриваемом диапазоне частот (от 10 кГц до 14 МГц) в соответствии со скин-эффектом электромагнитное поле затухает экспоненциально с удалением от источника. Это позволяет поставить нулевые граничные условия для вектора  $\vec{E}^a$  вдали от источника.

Используя консервативную конечно-разностную схему для случая разрывных коэффициентов на неравномерной сетке, приходим к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). После симметризации данная СЛАУ решается методом сопряжённых ортогональных невязок на графических процессорах с авторским предобуславливателем [Surodina, 2017].

# Численное моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ)

Задача численно моделирования сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками может быть сведена к решению следующего уравнения:

$$-\text{rot}(\rho * \text{rot}\vec{H}) - i\omega\mu\vec{H} = -\vec{j}_\varphi^\mu \quad (3)$$

Здесь где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление среды,

$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  - магнитная проницаемость,

$\omega$  - циклическая частота,

$\vec{j}$  - источник стороннего тока (плотность тока),

$\vec{H}$  - вектор магнитного поля.

Зависимость тока от времени гармоническая. Источник поля в виде тороидальной катушки вдали от нее формально можно описать круговым магнитным током [Светов, 1984]. Поэтому считаем, что источник в цилиндрической системе координат может быть задан в виде:

$$\vec{j}_0 = \{0, j_\varphi^\mu, 0\}, \quad j_\varphi^\mu = -i\omega\mu M_\varphi \delta(z - z_0) \delta(r - r_0)$$

где  $M_\varphi$  - магнитный момент,  $\delta$  - дельта функция Дирака,  $r_0$  - радиус кольца с током.

# Численное моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ)

Выделяя явно оператор Лапласа, приходим к эквивалентной записи:

$$-\rho\Delta\vec{H} + \text{grad}\rho \times \text{rot}\vec{H} - i\omega\mu\vec{H} = -\vec{j}_\varphi^\mu \quad (4)$$

В соответствии с условием излучения на бесконечности магнитное поле затухает с удалением от источника:

$$|H| \xrightarrow{r,z \rightarrow \infty} 0.$$

Это позволяет приближенно поставить нулевые граничные условия для компонент  $H_r, H_\varphi, H_z$  на большом расстоянии от источника. Нас интересует ограниченное решение при  $r = 0$ , которое удовлетворяет условию:

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial \vec{H}}{\partial r} = 0.$$

Таким образом, имеем задачу Дирихле для уравнения (4).



# Численное моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ)

Запишем уравнение (4) в матрично-векторном виде, объединяя первые два оператора:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_r \\ H_\varphi \\ H_z \end{pmatrix} - i\omega\mu \begin{pmatrix} H_r \\ H_\varphi \\ H_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 0 \\ j_\varphi^\mu \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$a_{11} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \frac{\partial}{\partial z} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \rho \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r)}{\partial r} \right)$$

$$a_{12} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \frac{\partial(r)}{\partial r} + \frac{2\rho}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$$a_{13} = \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial}{\partial r}$$

$$a_{21} = \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial r} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{2\rho}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$$a_{22} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \frac{\partial}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\rho}{r} \frac{\partial(r)}{\partial r} \right)$$

$$a_{23} = \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$$a_{31} = \frac{\partial \rho}{\partial r} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$a_{32} = \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$a_{33} = -\rho \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\partial}{\partial \varphi} \rho \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial(r)}{\partial r} \left( \rho \frac{\partial}{\partial r} \right)$$

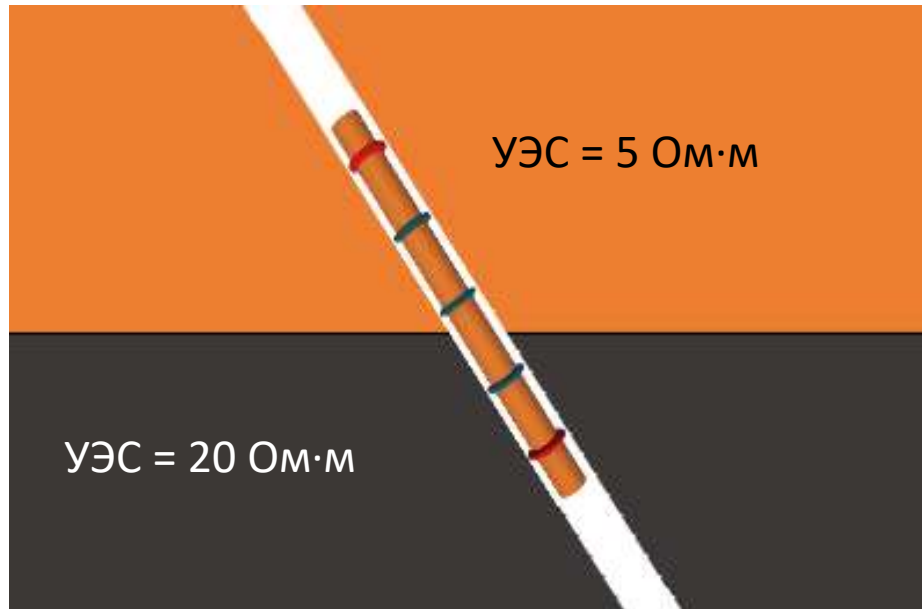
С помощью консервативной конечно-разностной схемы аппроксимируем систему уравнений (5), учитывая условие периодичности по переменной  $\varphi$  и условие ограниченности решения. После дискретизации получим систему линейных алгебраических уравнений с комплексной, неэрмитовой, несимметричной матрицей [Суродина и др., 2020].

# **Задачи, решаемые с помощью численного трехмерного моделирования сигналов российских зондов электрокаротажа**

- 1. Выявление зависимости сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками от толщины пласта, наклона скважины и контраста УЭС на геоэлектрических границах**
2. Сравнение глубины обнаружения границы по сигналам зондов электрокаротажа

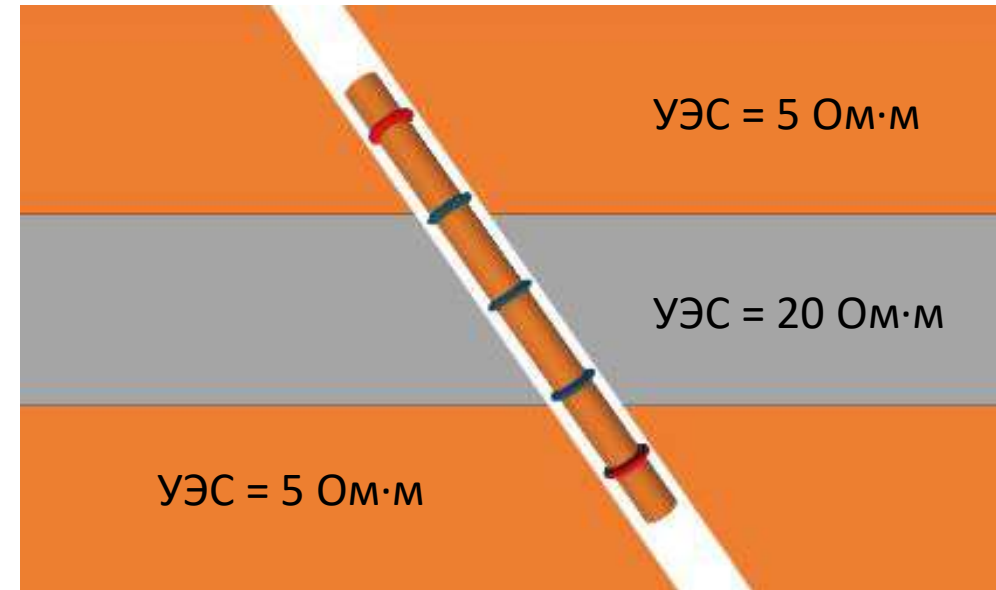
# Группы геоэлектрических моделей для 3D моделирования

Одна горизонтальная граница



**Пример:** глинистый пласт – нефтенасыщенный песчаный пласт.

Две горизонтальные границы

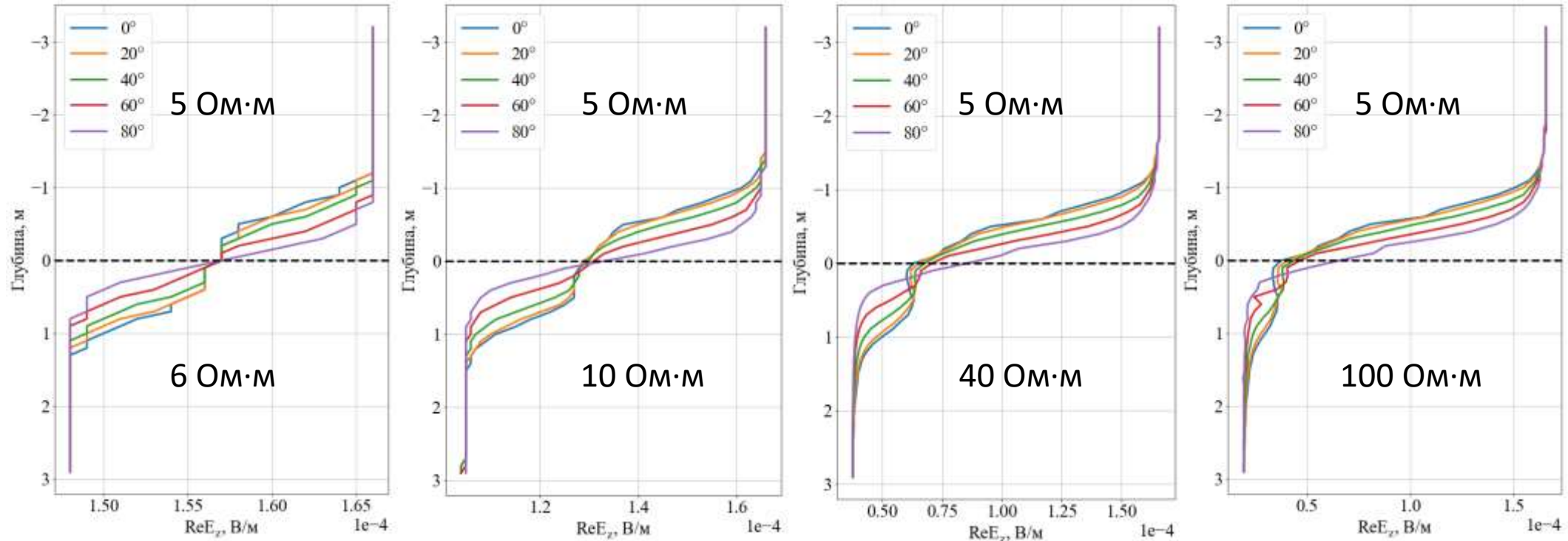


**Пример:** нефтенасыщенный песчаный пласт во вмещающих глинистых отложениях.

**Параметры скважины:**  
радиус = 0.108 м,  $УЭС = 2.0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

# 1. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ в средах с одной горизонтальной границей

Влияние контрастности УЭС между двумя средами ( $\frac{\rho_{\text{нижн}}}{\rho_{\text{верх}}}$ ) (**суммарный режим**)



$\frac{\rho_{\text{нижн}}}{\rho_{\text{верх}}}$

1.2

2

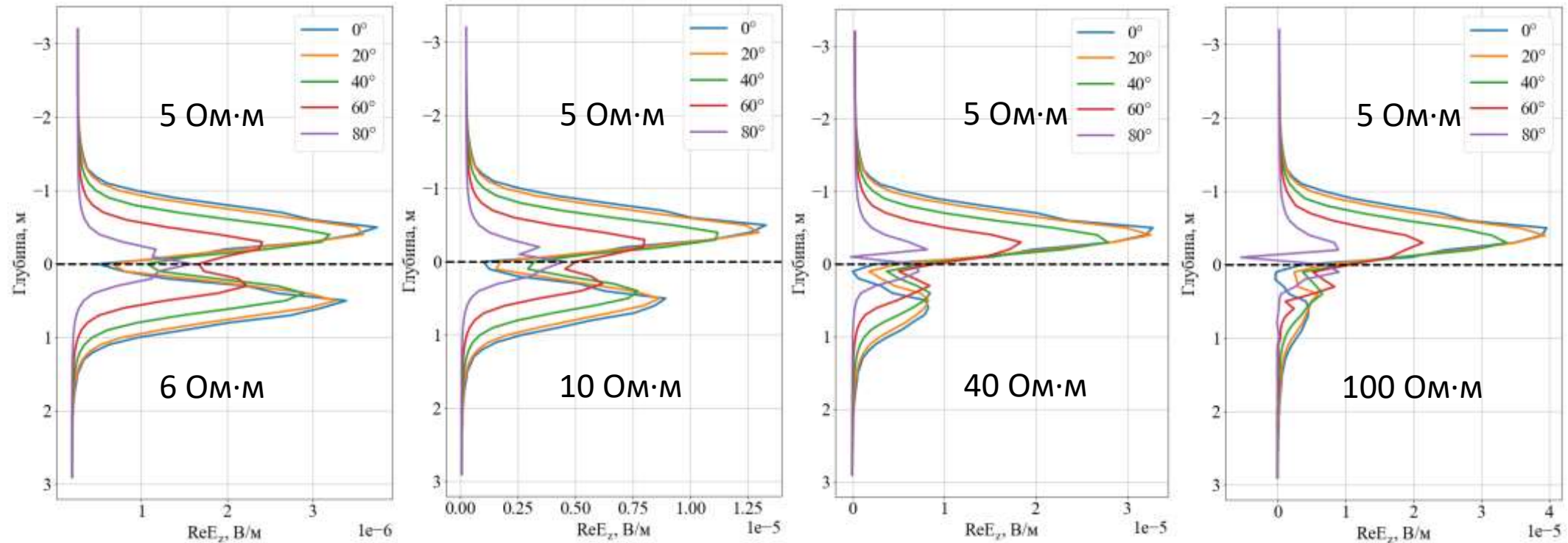
8

16

- Увеличение асимметрии диаграмм сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  относительно границы с **ростом контрастности УЭС**.
- Увеличение асимметрии наблюдается **при всех зенитных углах**.

# 1. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ в средах с одной горизонтальной границей

Влияние контрастности УЭС между двумя средами ( $\frac{\rho_{\text{нижн}}}{\rho_{\text{верх}}}$ ) (дифференциальный режим)



$\frac{\rho_{\text{нижн}}}{\rho_{\text{верх}}}$

1.2

2

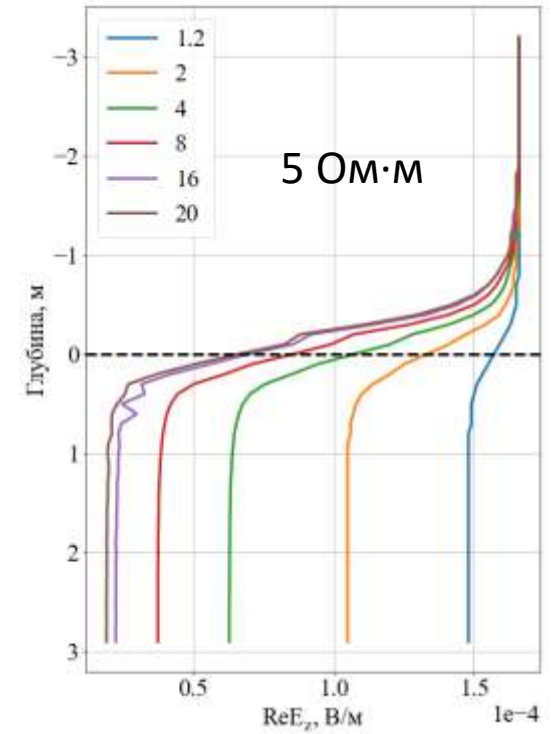
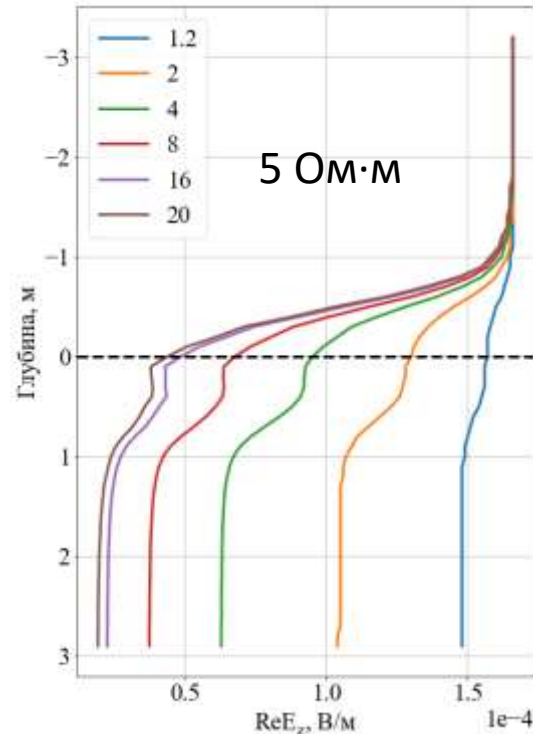
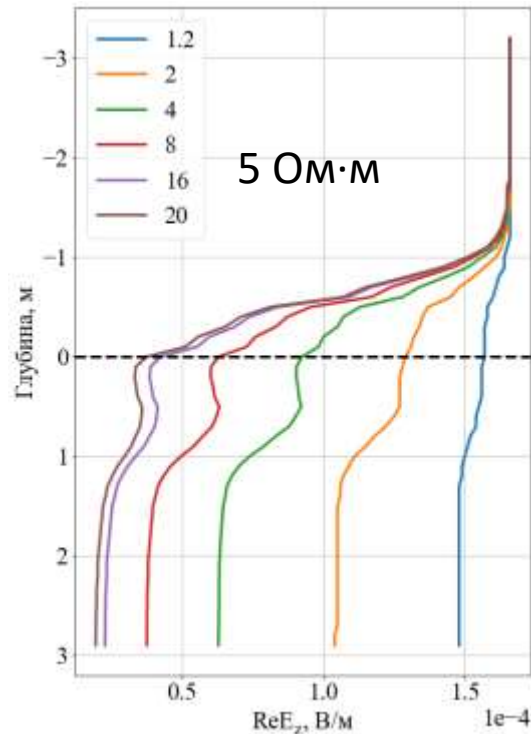
8

16

- Увеличение отношения значений экстремумов сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  в верхней и нижней среде от 1.1 до 10.5 при **росте контрастности УЭС** между двумя средами от 1.2 до 20.
- С увеличением **угла наклона** скважины от 0° до 80° экстремумы сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  возникают ближе (от 0.5 м до 0 м) к горизонтальной границе.

# 1. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ в средах с одной горизонтальной границей

Влияние угла наклона скважины (**суммарный режим**)



Зенитный угол

$0^\circ$

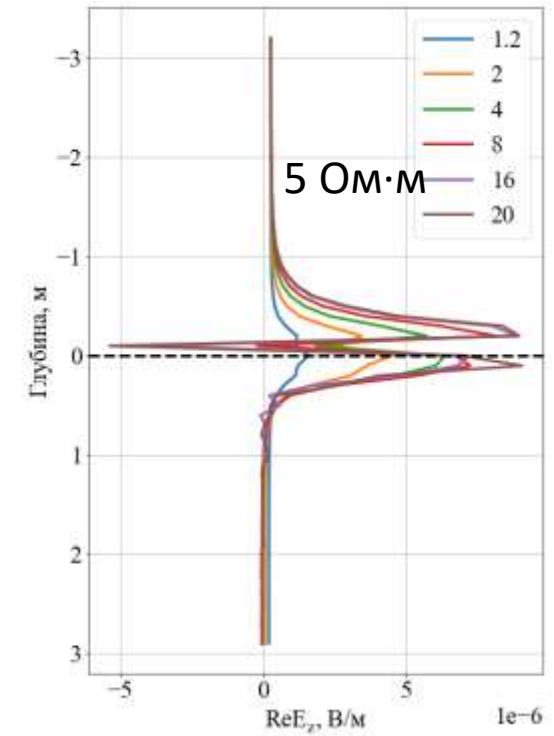
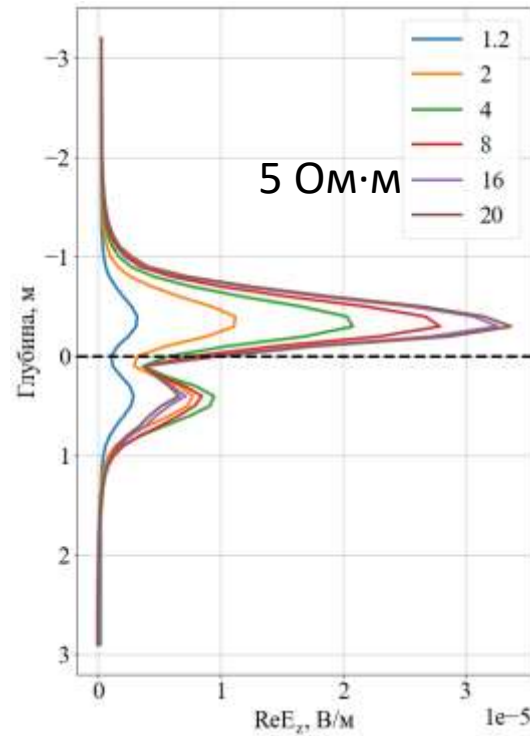
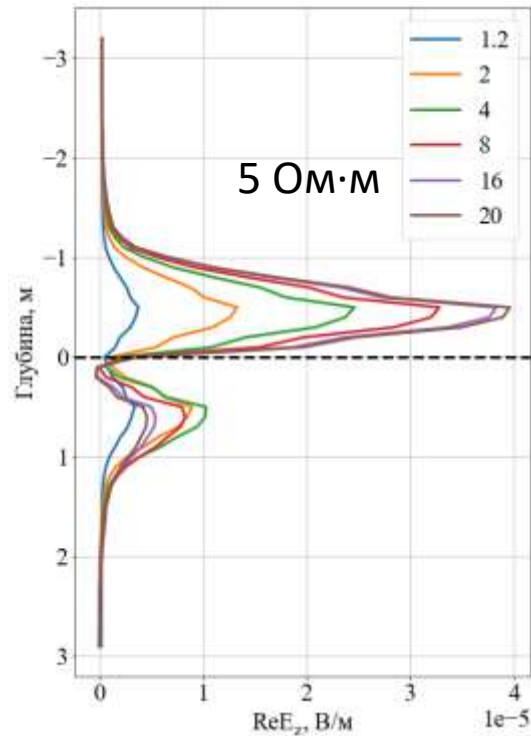
$40^\circ$

$80^\circ$

- При увеличении **зенитного угла** скважины от  $0^\circ$  до  $80^\circ$  сигналы выходят на асимптоту ближе к горизонтальной границе.
- Расстояние выхода сигнала на асимптоту уменьшается с 1.9 до 1.0 м от границы.

# 1. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ в средах с одной горизонтальной границей

Влияние угла наклона скважины (дифференциальный режим)



Зенитный угол

$0^\circ$

$40^\circ$

$80^\circ$

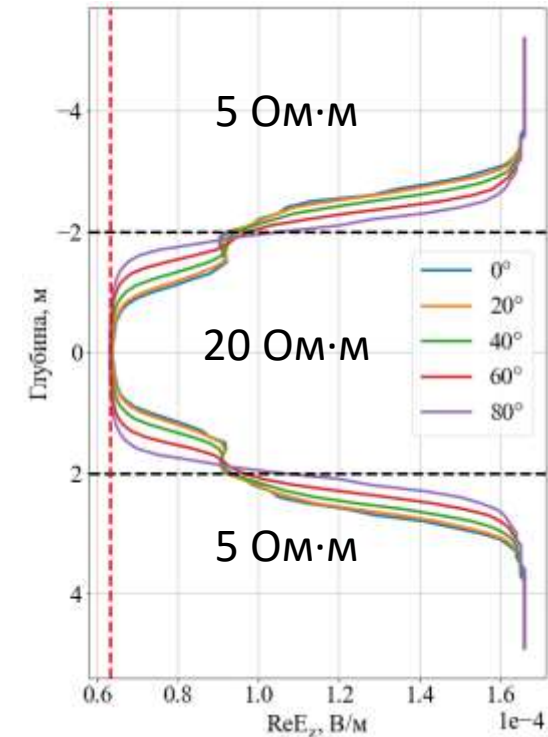
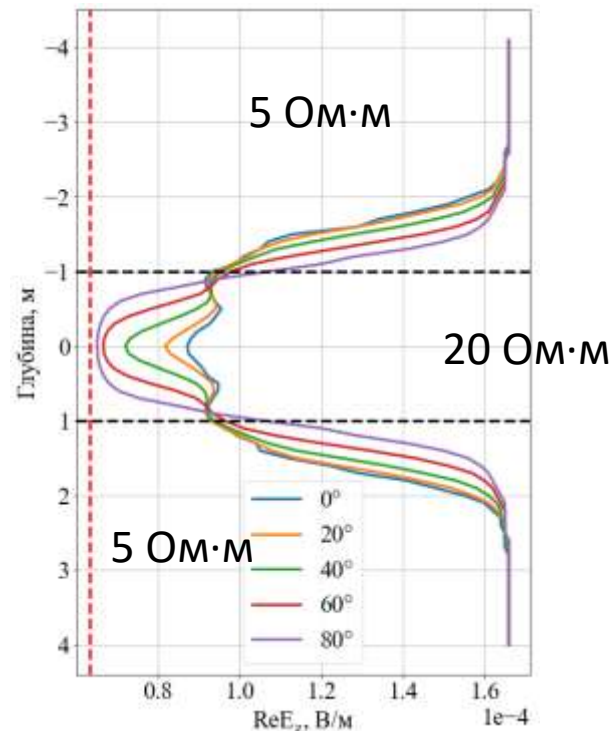
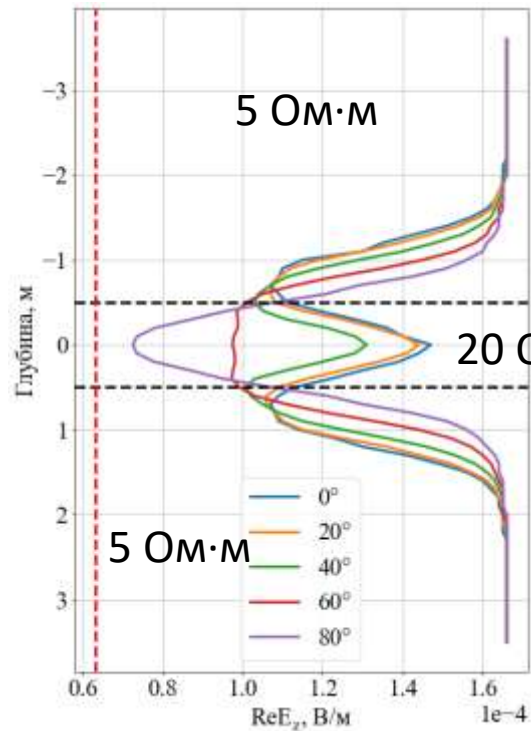
С увеличением угла от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ :

- усиление **локальности** экстремумов сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$ .
- кривые  $E_z$  и  $H_\phi$  становятся более **симметричными** относительно границы при любых контрастах УЭС.



## 2. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ: нефтенасыщенный коллектор во вмещающих глинах

Влияние толщины коллектора (**суммарный режим**)



Толщина  
коллектора

1 м

2 м

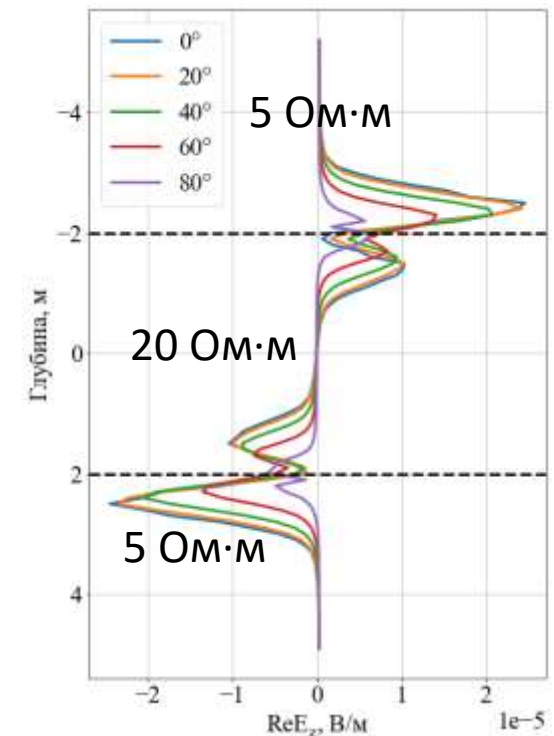
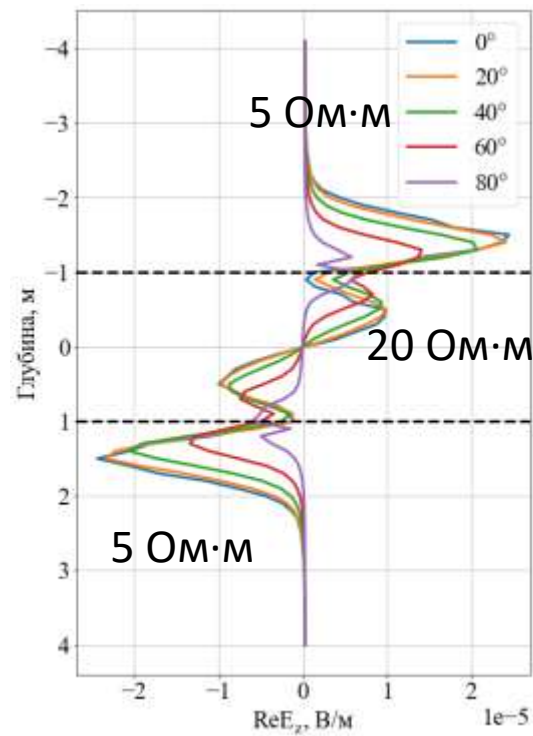
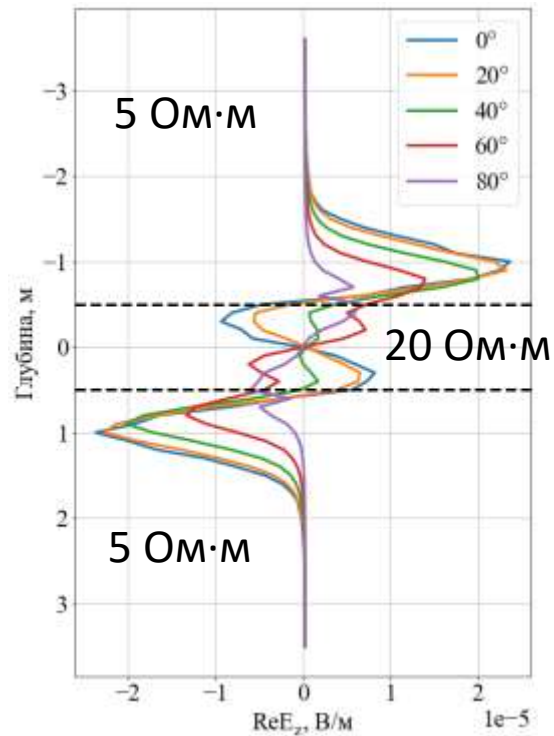
4 м

- При увеличении как **угла наклона** скважины от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ , так и **толщины** коллектора от 1 м до 4 м, значения сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  приближаются к асимптотическим в коллекторе ( $6.32 \cdot 10^{-5}$  В/м)
- При толщинах коллектора 1 м и менее наблюдается **инвертирование** сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$ , в связи с влиянием вмещающих толщ



## 2. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ: нефтенасыщенный коллектор во вмещающих глинах

Влияние толщины коллектора (дифференциальный режим)



Толщина  
коллектора

1 м

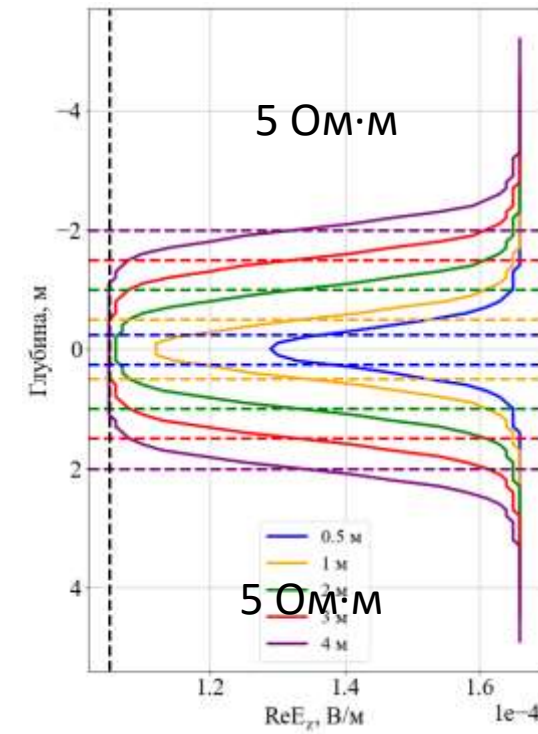
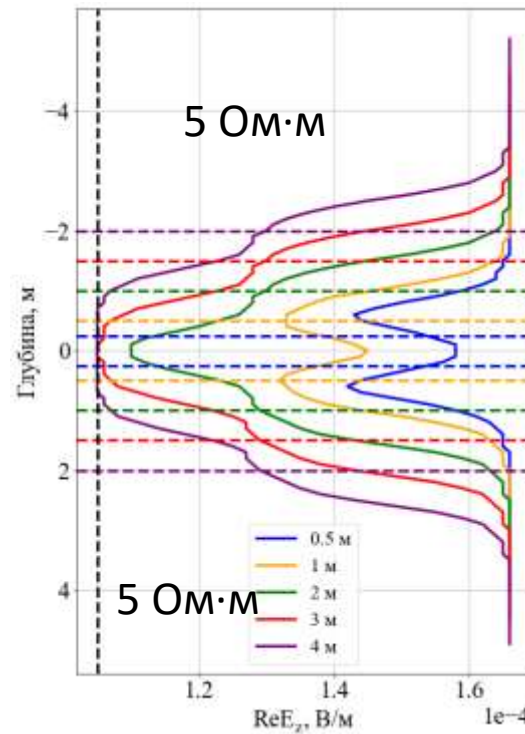
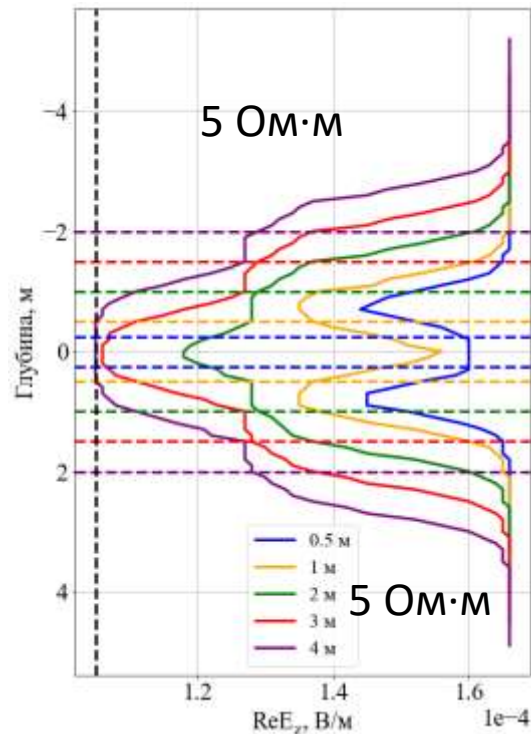
2 м

4 м

- С увеличением **угла наклона** скважины от  $0^\circ$  до  $80^\circ$  экстремумы сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  возникают ближе к границам пластов (в 0.5 м от границы при  $0^\circ$  и в области границы при  $80^\circ$ )
- Сигнал принимает асимптотическое значение (0 В/м) в центре пласта при толщине коллектора  $\geq 4$  м, независимо от угла

## 2. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ: нефтенасыщенный коллектор во вмещающих глинах

Влияние толщины коллектора (**суммарный режим**)



Зенитный угол

$0^\circ$

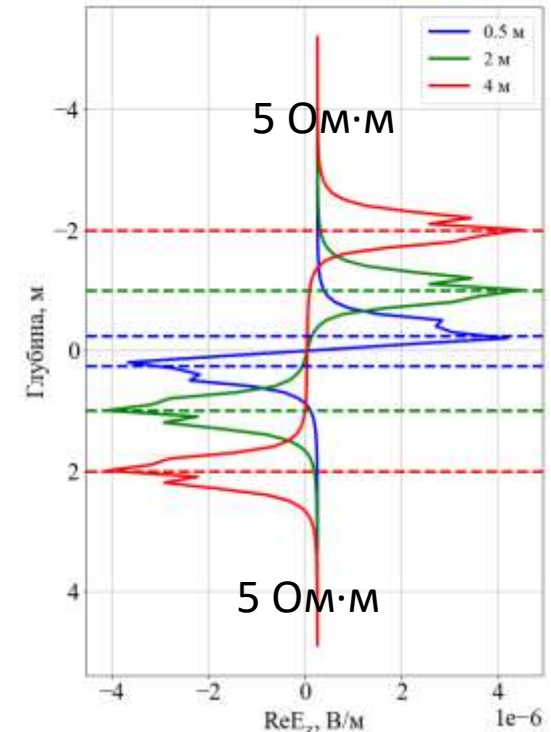
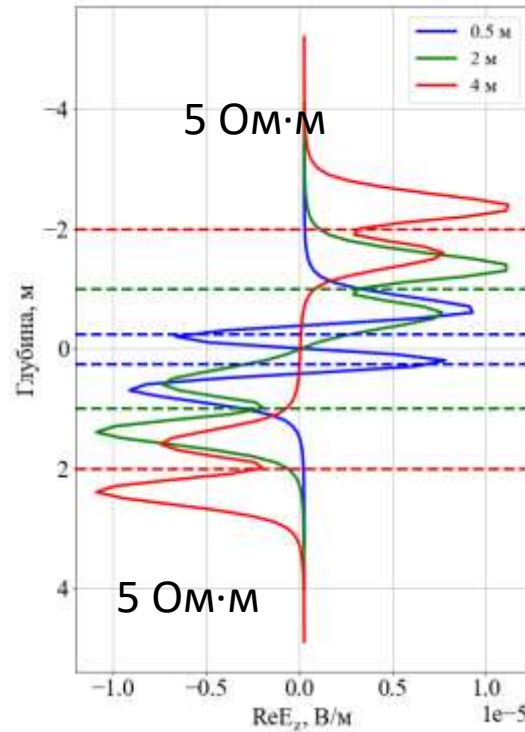
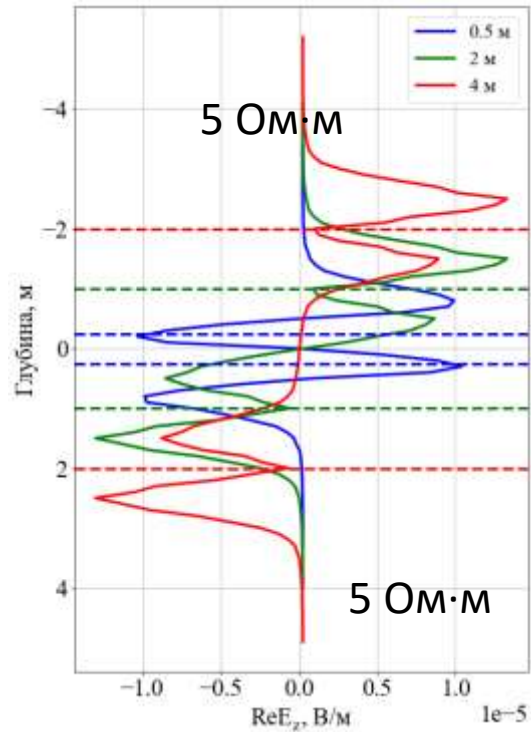
$40^\circ$

$80^\circ$

- При **увеличении** как **толщины** коллектора от 0.5 м до 4 м, так и **зенитного угла** от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ , значения сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  приближаются к асимптотическим в коллекторе ( $6.32 \cdot 10^{-5}$  В/м).
- При **зенитных углах** от  $0^\circ$  до  $40^\circ$  отмечается **инвертирование** сигналов  $E_z$  и  $H_\phi$  при толщинах коллектора 1 м и менее, в связи с влиянием вмещающих толщ. При  $80^\circ$  инвертирования нет, вне зависимости от толщины коллектора.

## 2. Результаты 3D моделирования сигналов ЗЭТ: нефтенасыщенный коллектор во вмещающих глинах

Влияние толщины коллектора (**суммарный режим**)



Зенитный угол

$0^\circ$

$40^\circ$

$80^\circ$

- При **малой** толщине коллектора ( $\leq 1$  м) границы выделяются по одному экстремуму, второй экстремум возникает во вмещающей толще.
- При **увеличении** угла от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ , границы отбиваются более локальными экстремумами.

# Выводы по разделу

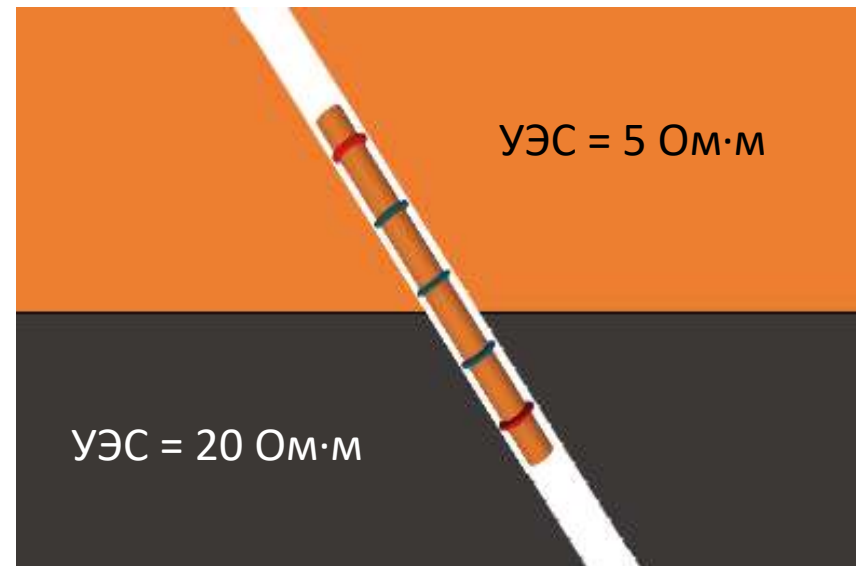
- Отчетливая **зависимость сигналов** электромагнитного каротажного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ от:
  - **электрического контраста** в разрезе
  - **толщины коллектора**при изменении зенитного угла нефтегазовой скважины в широком диапазоне значений (от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ ).
- Сделан первый шаг к **решению актуальной задачи геонавигации** наклонно-горизонтальных нефтегазовых скважин по данным каротажного зонда ЗЭТ.

# **Задачи, решаемые с помощью численного трехмерного моделирования сигналов российских зондов электрокаротажа**

1. Выявление зависимости сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками от толщины пласта, наклона скважины и контраста УЭС на геоэлектрических границах
2. **Сравнение глубины обнаружения границы по сигналам зондов электрокаротажа**

# Сравнение глубины обнаружения границы по сигналам зондов электрокаротажа

- Моделируются сигналы в моделях с одной горизонтальной границей
- Зенитные углы:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$
- УЭС верхнего слоя =  $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , УЭС нижнего: 6, 10, 20, 40, 80, 100  $\text{Ом}\cdot\text{м}$
- Глубина обнаружения соответствует расстоянию, на котором заметен отклик от приближающегося пласта, численно данный отклик должен превосходить два уровня шума [Bittar et al., 2008].
- Критерий обнаружения границы: отклонение сигнала от асимптоты на 10%

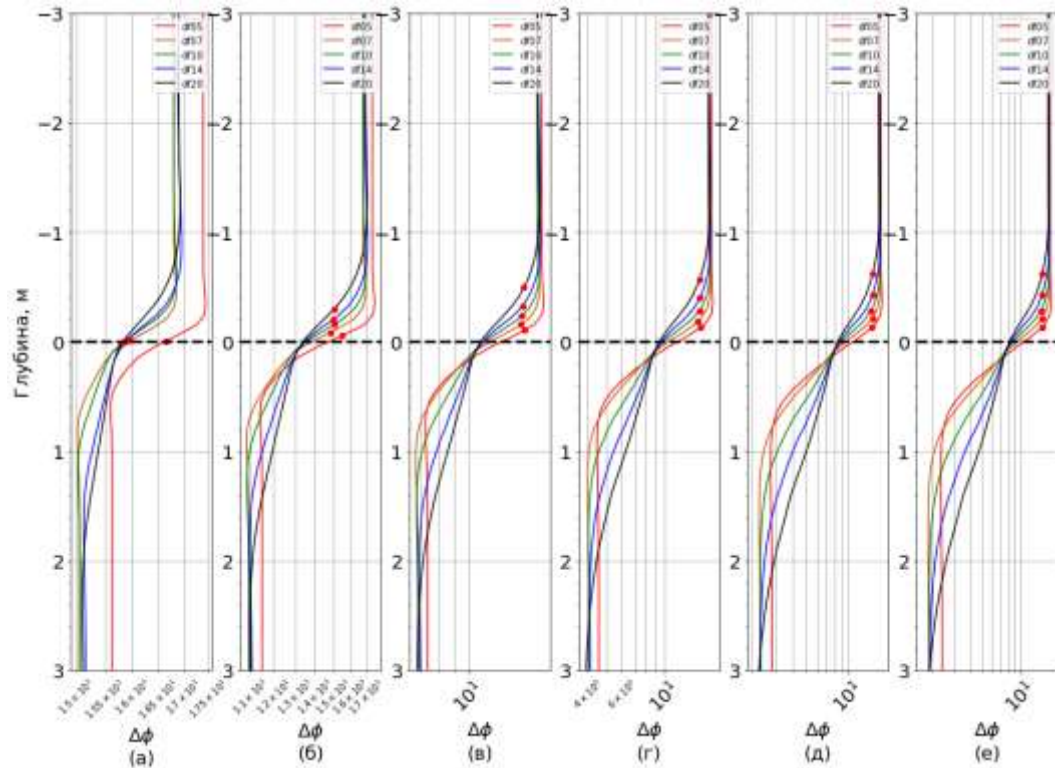


*Пример геоэлектрической модели*



# Сравнение глубины обнаружения границы по сигналам зондов электрокаротажа

## ВИКИЗ. Разность фаз



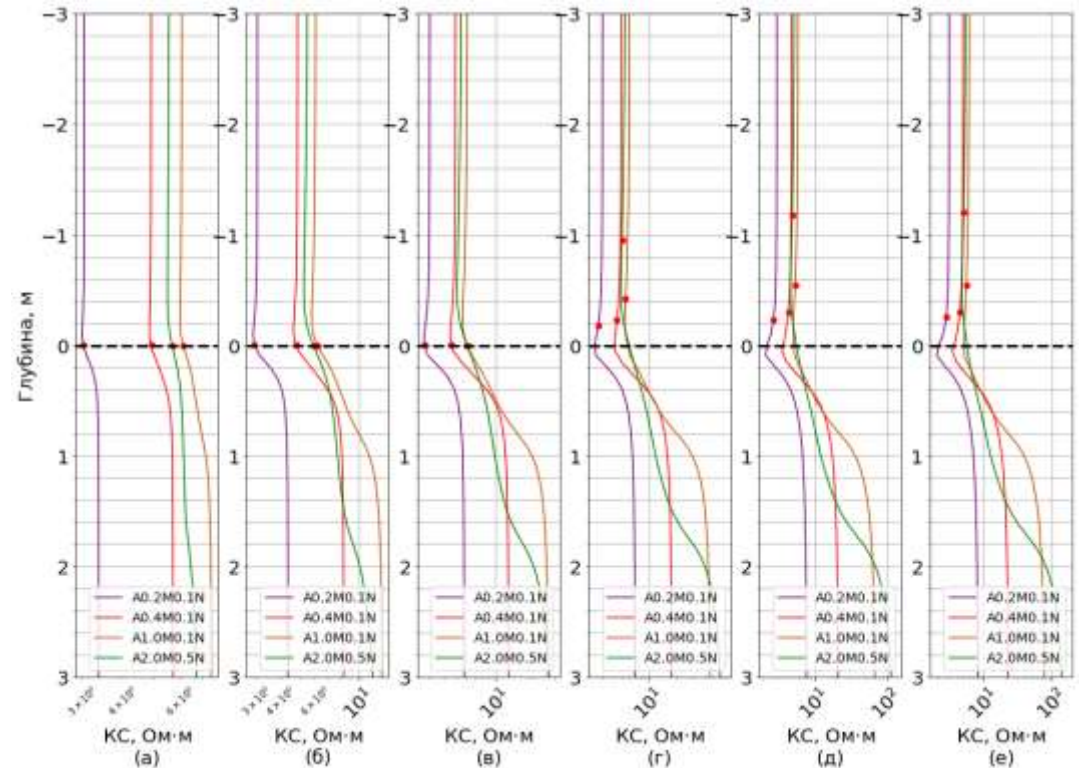
Разность фаз ВИКИЗ.

Наклон скважины  $40^\circ$ .

Контрасты УЭС: 1.2 (а), 2 (б), 4 (в), 8 (г), 16 (д) и 20 (е).

УЭС верхнего пласта 5 Ом·м.

## БКЗ. Кажущееся сопротивление



Кажущееся сопротивление БКЗ.

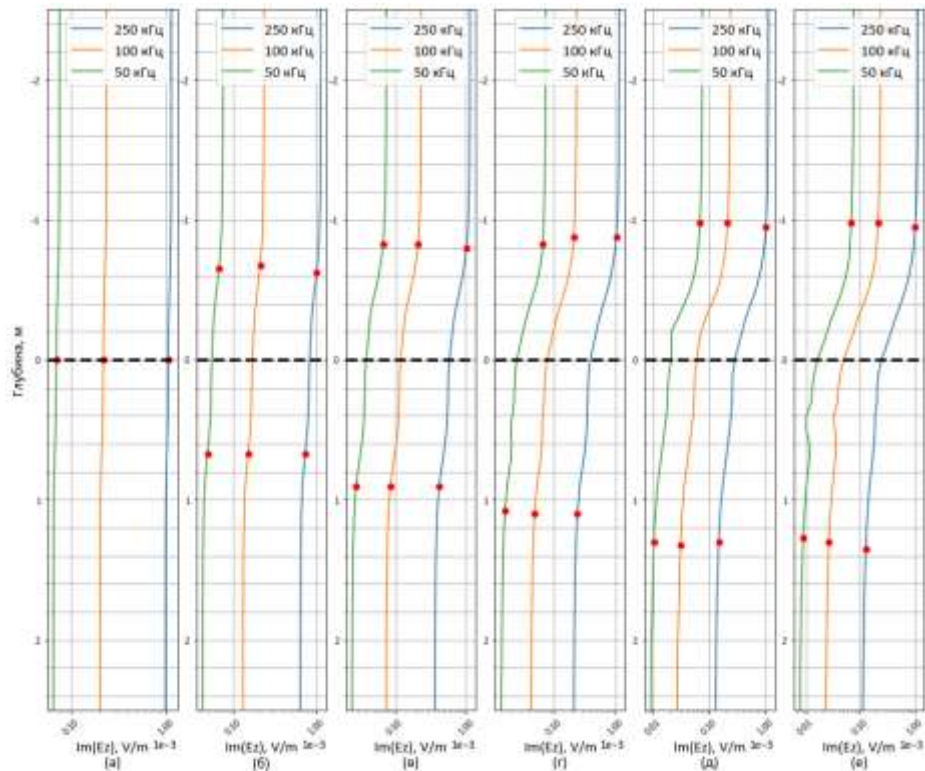
Наклон скважины  $40^\circ$ .

Контрасты УЭС: 1.2 (а), 2 (б), 4 (в), 8 (г), 16 (д) и 20 (е).

УЭС верхнего пласта 5 Ом·м.

# Сравнение глубины обнаружения границы по сигналам зондов электрокаротажа

## ЗЭТ. Суммарный режим



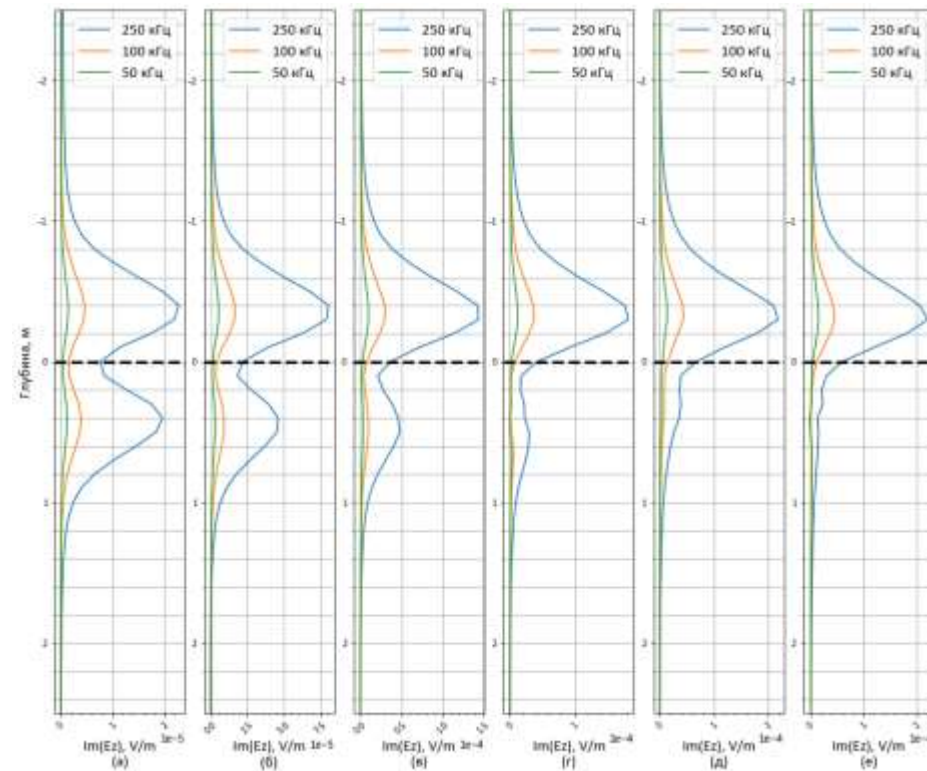
$E_z$  при суммарном режиме работы.

Наклон скважины  $40^\circ$ .

Контрасты УЭС: 1.2 (а), 2 (б), 4 (в), 8 (г), 16 (д) и 20 (е).

УЭС верхнего пласта 5 Ом·м.

## ЗЭТ. Дифференциальный режим



$E_z$  при дифференциальном режиме работы.

Наклон скважины  $40^\circ$ .

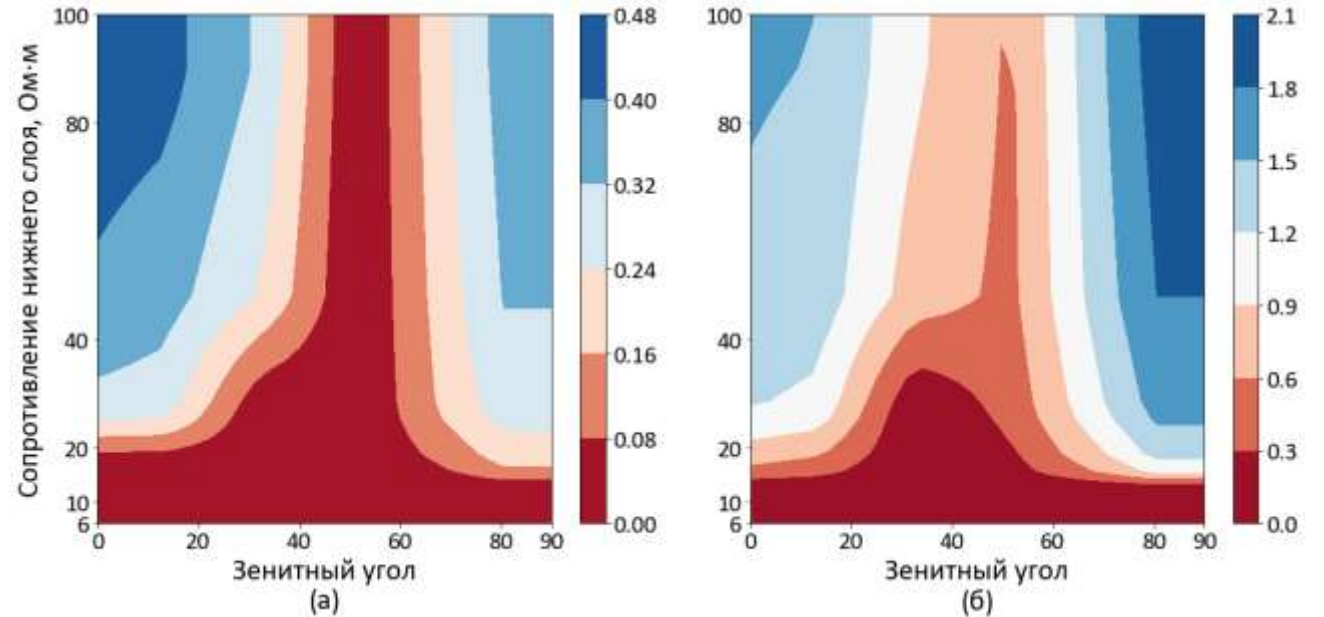
Контрасты УЭС: 1.2 (а), 2 (б), 4 (в), 8 (г), 16 (д) и 20 (е).

УЭС верхнего пласта 5 Ом·м.



# Глубина обнаружения по откликам БКЗ

- По данным кажущегося сопротивления (КС) последовательных градиент-зондов с расстоянием между приемными электродами 10 см можно отметить приближение к контрастной границе на большем расстоянии, если скважина вертикальная или горизонтальная. При наклонной скважине чувствительность к соседнему пласту наименьшая.
- По расчётным данным последовательных градиент-зондов с расстоянием между приемными электродами 50 см можно зафиксировать приближение к границе на большом расстоянии в сильно наклонных и горизонтальных скважинах.



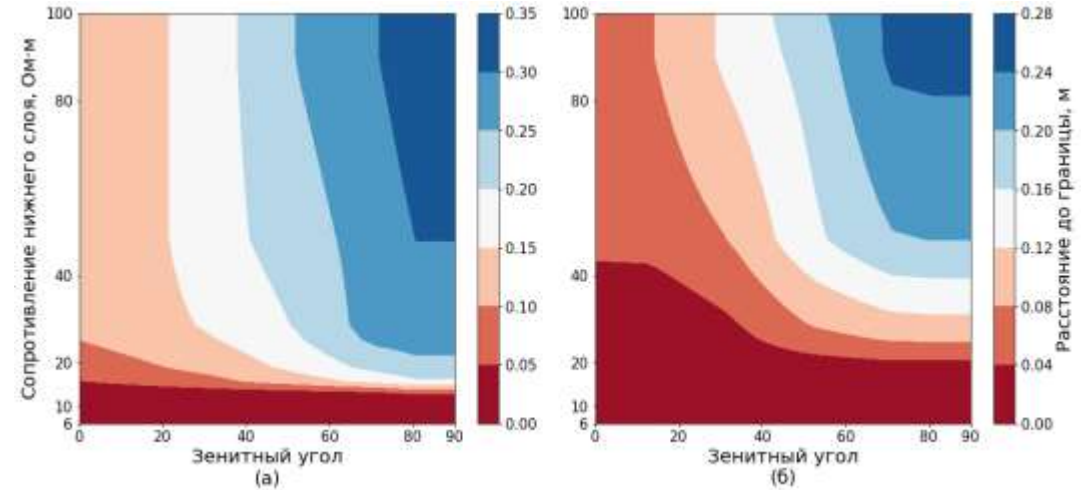
*Глубина обнаружения границы по диаграммам БКЗ при изменении сопротивления нижнего пласта и угла наклона скважины.*

*УЭС верхнего пласта составляет 5 Ом·м.*

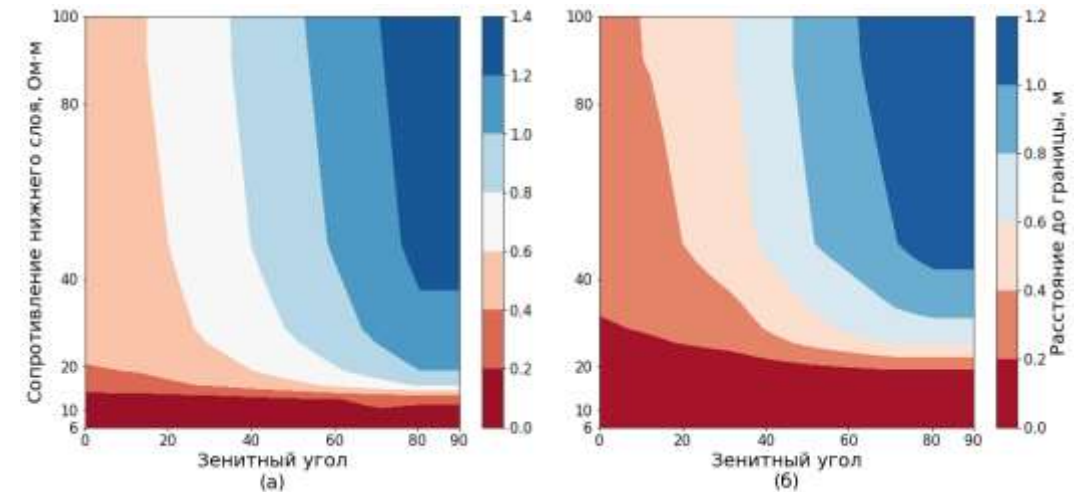
*Зонды БКЗ: A0.4M0.1N (а) и A2.0M0.5N (б).*

# Глубина обнаружения по сигналам ВИКИЗ (разность фаз и отношение амплитуд)

Диаграммы (разности фаз и отношения амплитуд) ВИКИЗ отражают приближение к контрастной границе на большем расстоянии до контрастной границе при увеличении угла наклона скважины и контраста УЭС на границе



Глубина обнаружения границы по зонда **df05**.  
а) разность фаз; б) отношение амплитуд.

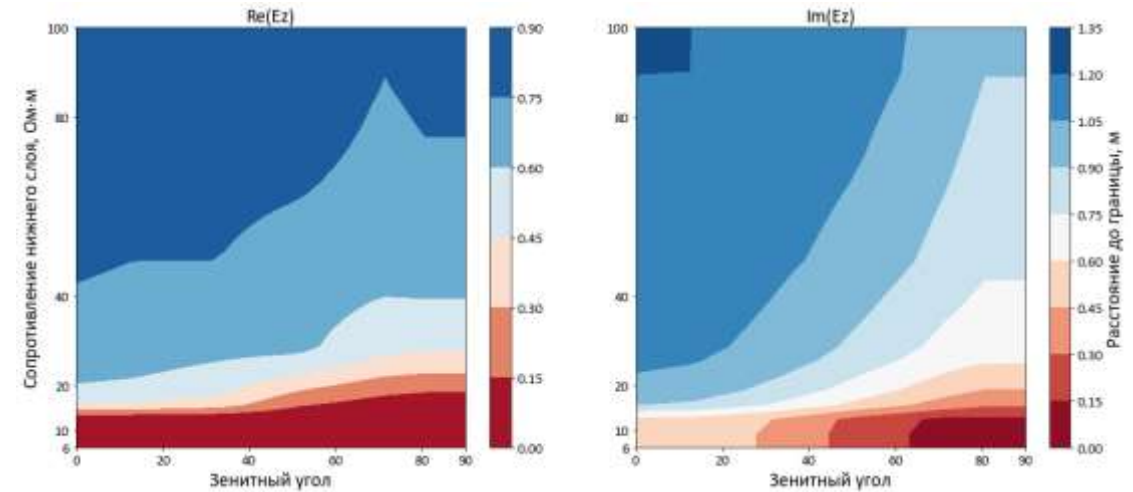


Глубина обнаружения границы по сигналам зонда **df20**.  
а) разность фаз; б) отношение амплитуд.

# Глубина обнаружения по сигналам электромагнитного зонда с тороидальными катушками

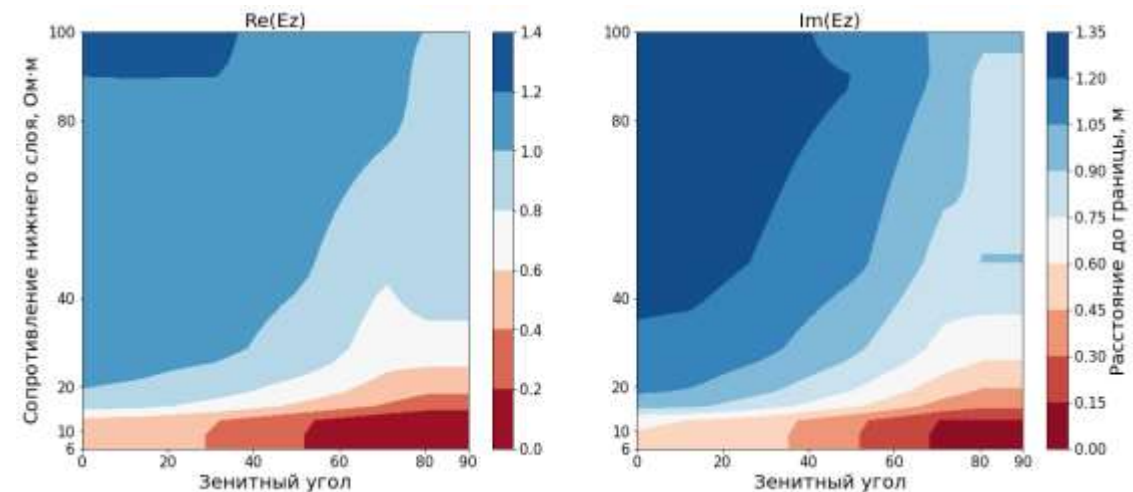
При анализе вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$  выделяются следующие особенности:

- Чем больше частота сигнала, тем на меньшем расстоянии можно отследить приближение к границе.
- Мнимая компонента  $E_z$  реагирует на приближение к целевому пласту на большей дистанции, чем действительная компонента поля.
- С увеличением контраста УЭС на границе расстояние обнаружения подстилающего пласта возрастает.
- По мере увеличения угла наклона скважины глубина обнаружения границы уменьшается.



Глубина обнаружения по действительной и мнимой составляющей  $E_z$  в суммарном режиме работы.

Частота 250 кГц



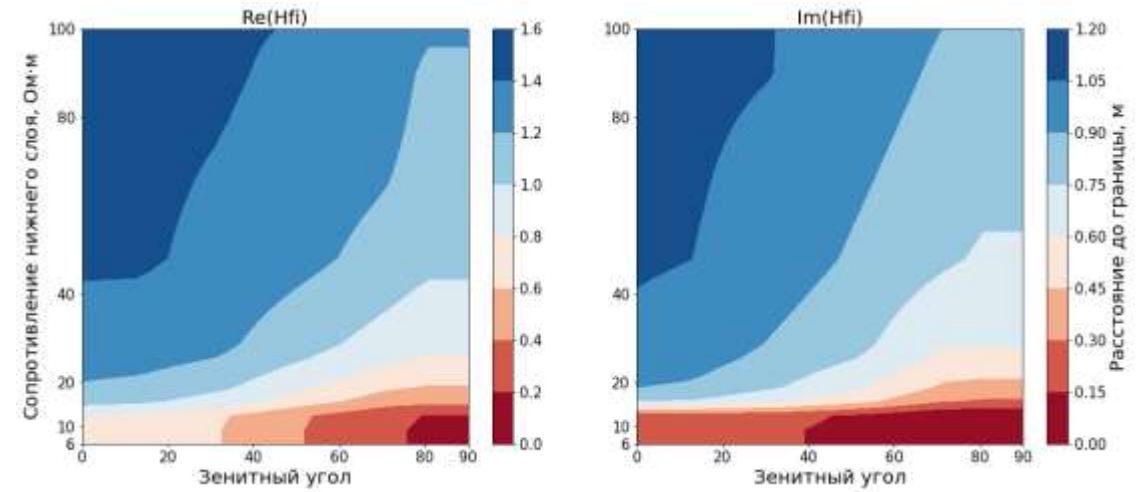
Глубина обнаружения по действительной и мнимой составляющей  $E_z$  в суммарном режиме работы.

Частота 50 кГц

# Глубина обнаружения по сигналам электромагнитного зонда с тороидальными катушками

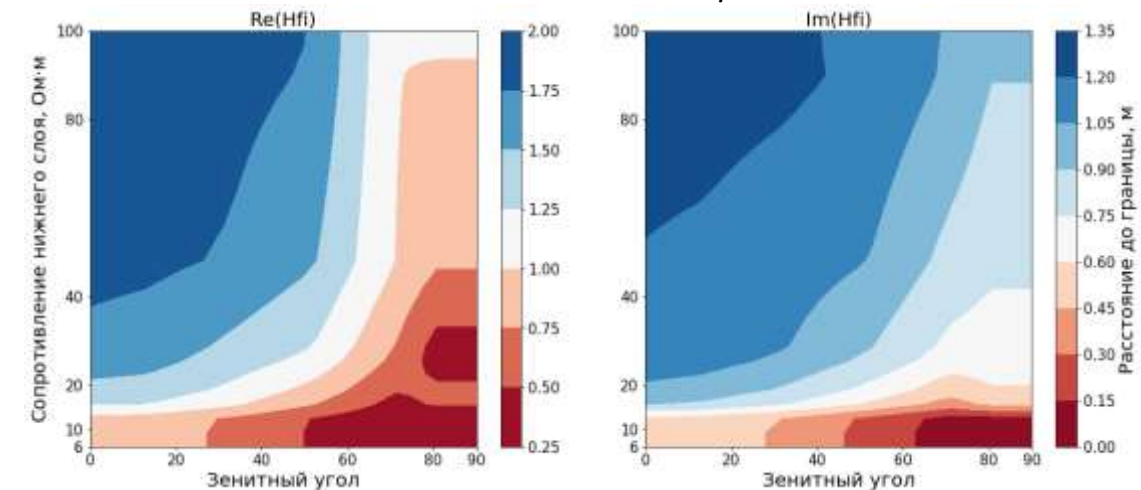
При анализе тангенциальной компоненты магнитного поля  $H_\varphi$  выделяются следующие особенности:

- Уменьшение глубины обнаружения границы по мере увеличения частоты сигнала от 50 до 250 кГц.
- Действительная компонента  $H_\varphi$  реагирует на приближение к целевому пласту на большей дистанции, чем мнимая компонента поля.
- С увеличением контраста УЭС на границе расстояние обнаружения увеличивается.
- По мере увеличения зенитного угла скважины глубина обнаружения границы по сигналам  $H_\varphi$  уменьшается.



Глубина обнаружения по действительной и мнимой составляющей  $H_\varphi$  в суммарном режиме работы.

Частота 250 кГц



Глубина обнаружения по действительной и мнимой составляющей  $H_\varphi$  в суммарном режиме работы.

Частота 50 кГц

# Значения глубины обнаружения

Увеличение контраста УЭС на границе

	ЗЭТ, Re(H <sub>φ</sub> )			ВИКИЗ, Δφ			БКЗ, КС Ом·м		
	250 кГц	100 кГц	50 кГц	df05	df10	df20	A0.4M0.1N	A1.0M0.1N	A4.0M0.5N
0°	0.825	1	1	0.05	0.2	0.35	0.25	0.75	2.55
40°	0.75	0.8	0.8	0.1	0.25	0.5	0	0	0.1
90°	0.3	0.4	0.4	0.2	0.45	0.95	0.2	0.7	3.2

Глубина обнаружения границы (в метрах) при контрасте УЭС, равному **2**

	ЗЭТ, Re(H <sub>φ</sub> )			ВИКИЗ, Δφ			БКЗ, КС Ом·м		
	250 кГц	100 кГц	50 кГц	df05	df10	df20	A0.4M0.1N	A1.0M0.1N	A4.0M0.5N
0°	1.1	1.15	1.2	0.1	0.2	0.5	0.5	1.3	3.6
40°	1	1.08	1.12	0.2	0.3	0.7	0.4	1	3.2
90°	0.7	0.8	0.8	0.3	0.6	1.2	0.3	1.1	4.6

Глубина обнаружения границы (в метрах) при контрасте УЭС, равному **8**

	ЗЭТ, Re(H <sub>φ</sub> )			ВИКИЗ, Δφ			БКЗ, КС Ом·м		
	250 кГц	100 кГц	50 кГц	df05	df10	df20	A0.4M0.1N	A1.0M0.1N	A4.0M0.5N
0°	1.1	1.2	1.25	0.1	0.2	0.5	0.6	1.5	3.8
40°	1.05	1.15	1.25	0.2	0.35	0.75	0.45	1.15	3.25
90°	0.9	1	1.05	0.3	0.6	1.3	0.3	1.2	4.9

Глубина обнаружения границы (в метрах) при контрасте УЭС, равному **20**

# Выводы по разделу

## Общие закономерности

Глубина обнаружения границы возрастает с **увеличением контраста УЭС** для всех описанных методов электрокаротажа

## Особенности каждого прибора

### **Изменение зенитного угла:**

БКЗ: наибольшая глубина обнаружения в вертикальных и горизонтальных скважинах, наименьшая – в наклонных ( $40^\circ$ - $60^\circ$ ).

ВИКИЗ: наибольшая глубина обнаружения в горизонтальных скважинах, наименьшая – в вертикальных.

ЗЭТ: наибольшая глубина обнаружения в вертикальных скважинах, наименьшая – в горизонтальных.

### **Изменение параметров отдельно у каждого прибора:**

#### БКЗ:

- С увеличением расстояния между измерительными электродами увеличивается глубина обнаружения границы.

#### ВИКИЗ:

- С увеличением длины зонда растет глубина обнаружения границы.
- По разности фаз можно отметить границу на большем расстоянии, чем по отношению амплитуд.

#### ЗЭТ:

- С увеличением частоты сигнала уменьшается глубина обнаружения границы.
- По  $\text{Im}(E_z)$  глубина обнаружения выше, чем по  $\text{Re}(E_z)$ .
- По  $\text{Im}(H_\phi)$  глубина обнаружения ниже, чем по  $\text{Re}(H_\phi)$ .

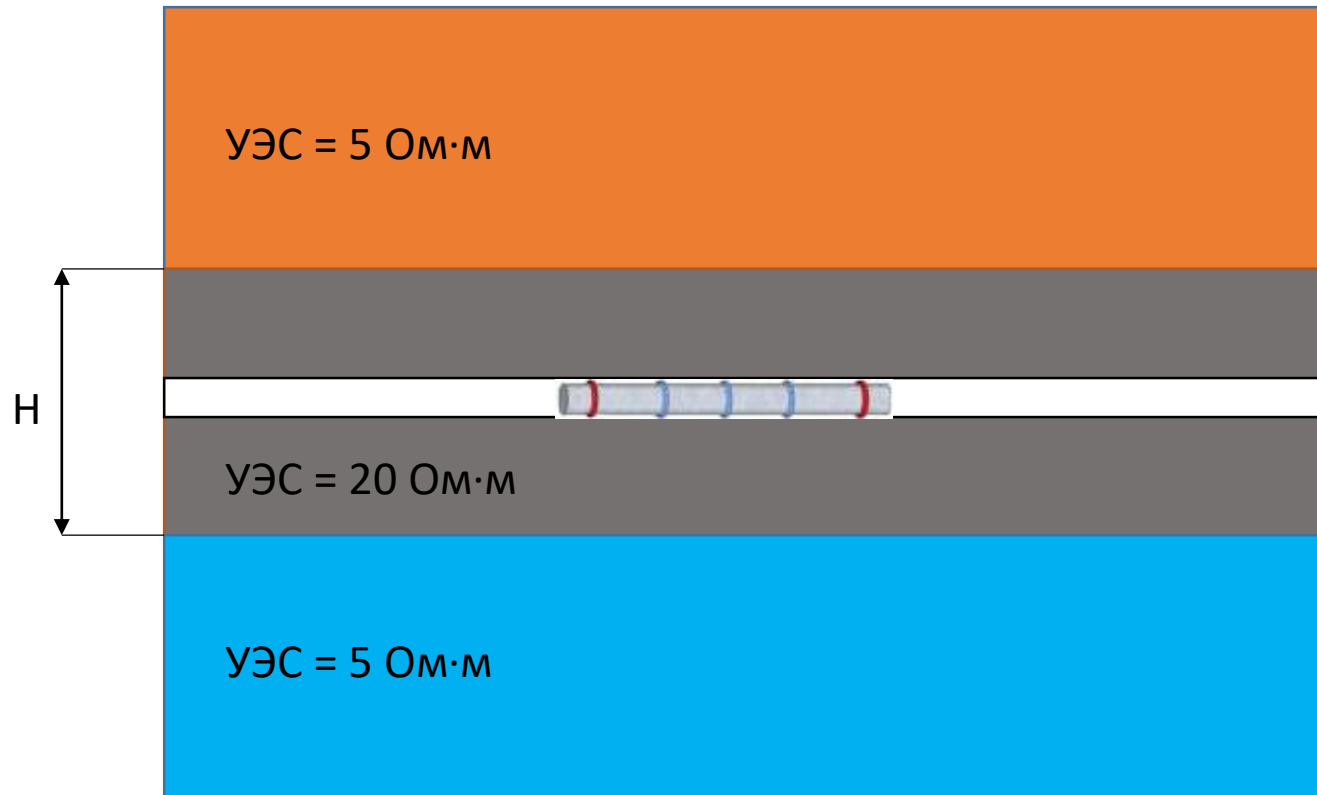


# Заключение

- В рамках данного исследования использованы алгоритмы конечно-разностного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования, высокочастотного электромагнитного каротажа и электромагнитного зонда с тороидальными катушками. Для численного расчета сигналов задействованы вычислительные ресурсы Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.
- Впервые были смоделированы отклики от тороидальных источников в **трехмерной постановке**. Изучены особенности сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками в зависимости от параметров геоэлектрических моделей (угол скважины, контраст УЭС на границах, толщины пластов).
- Сравнены глубины обнаружения границы по откликам трех **российских приборов электрокаротажа** в двухслойных средах с варьирующимся контрастом УЭС, разрезы которых вскрыты скважинами под углами от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

# Планы на будущее

1. Анализ влияния вмещающих толщ на показания российских приборов электрокаротажа

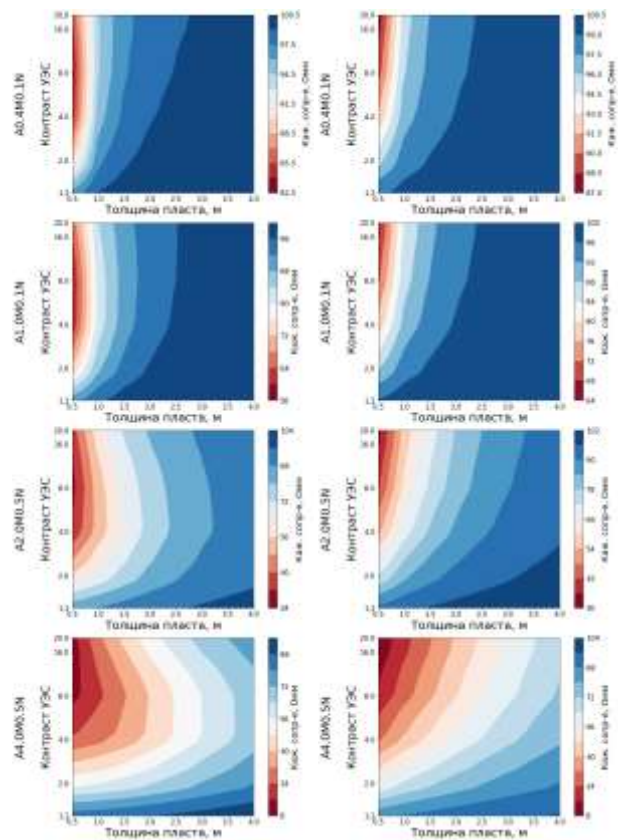


*Пример геоэлектрической модели*

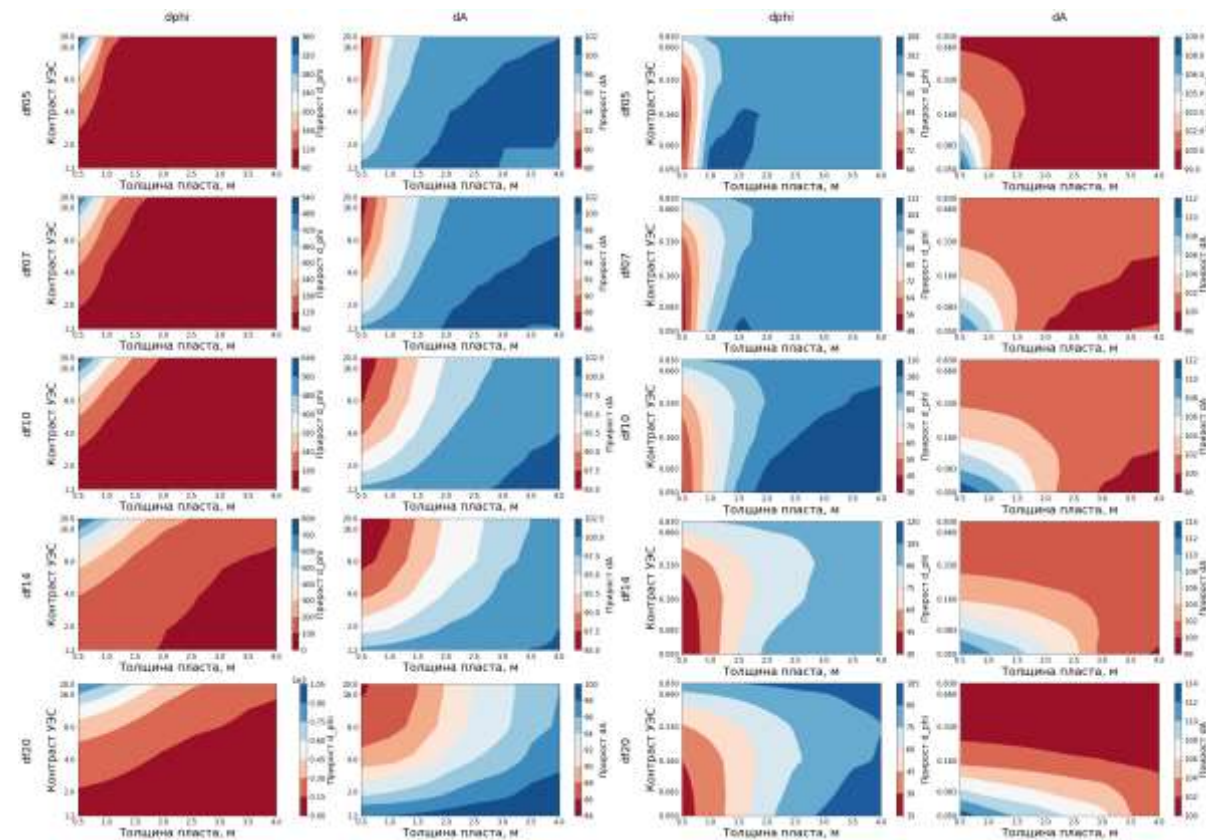


# Планы на будущее

## 1. Анализ влияния вмещающих толщ на показания российских приборов электрокаротажа



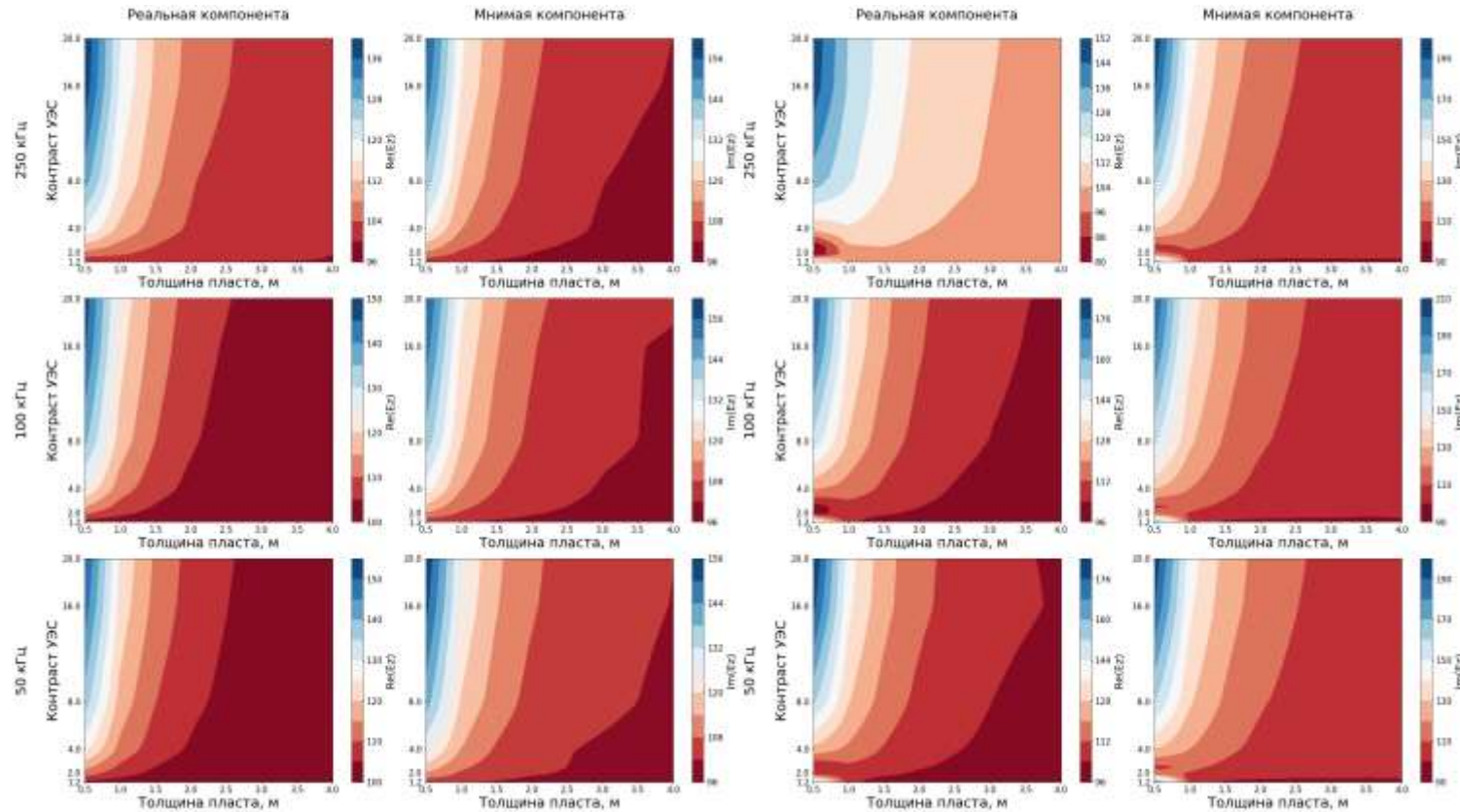
*Влияние вмещающих толщ на показания БКЗ*



*Влияние вмещающих толщ на сигнал ВИКИЗ*

# Планы на будущее

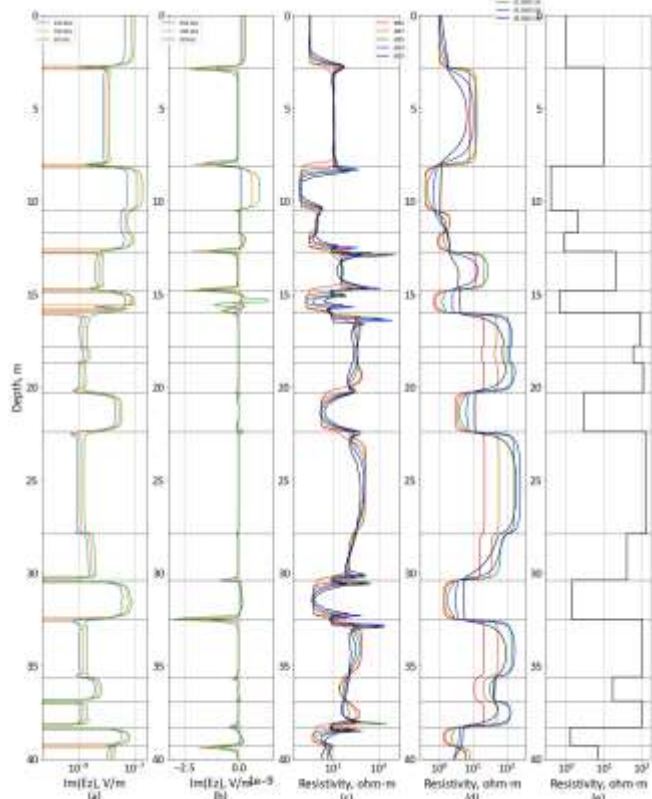
## 1. Анализ влияния вмещающих толщ на показания российских приборов электрокаротажа



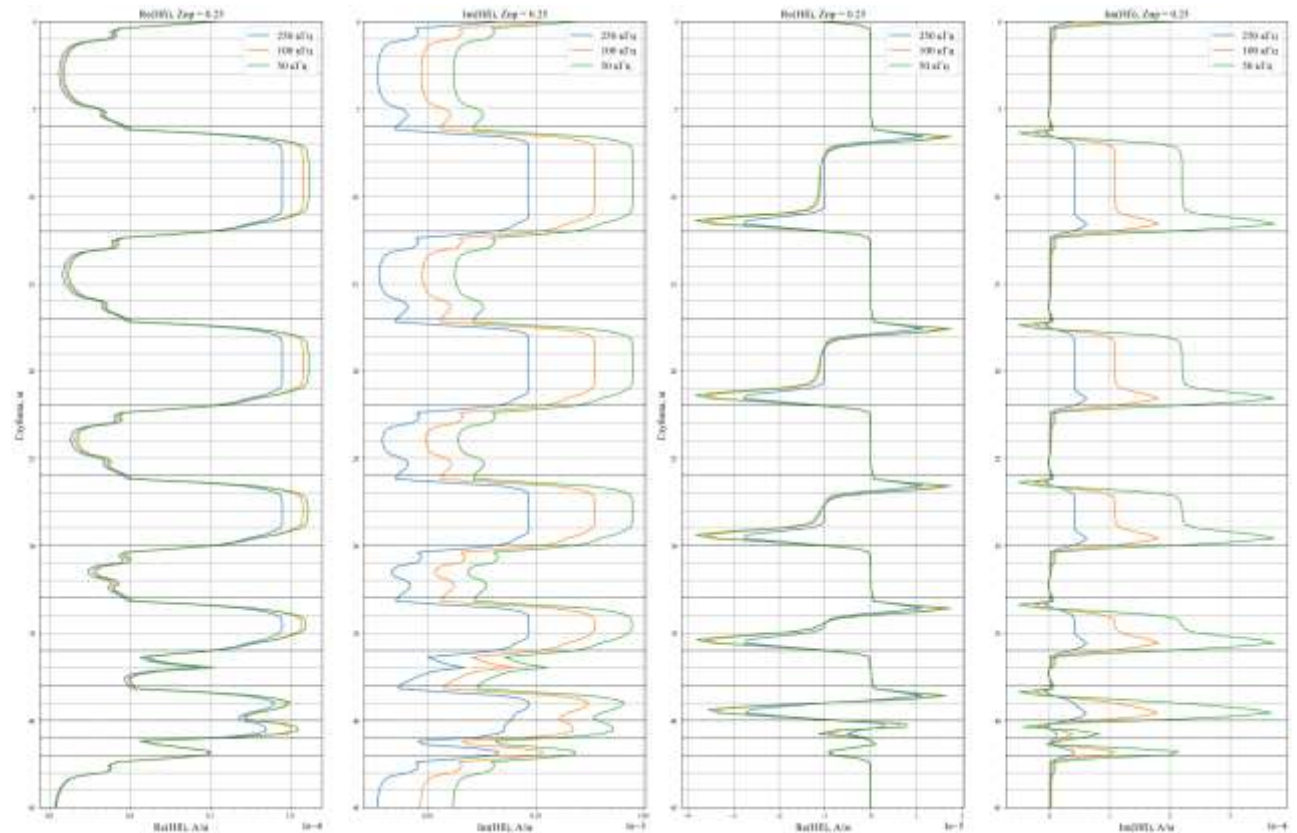
*Влияние вмещающих толщ на сигнал электромагнитного зонда с тороидальными катушками*

# Планы на будущее

2. Моделирование и анализ сигналов в моделях с реалистичной траекторией скважины при геонавигации
3. Моделирование и анализ сигналов в тонкослоистых геоэлектрических моделях и моделях-эталонах (Oklahoma, Chirp)



Сигналы ЗЭТ, ВИКИЗ, БКЗ в модели-бэнчмарке Oklahoma



Сигналы ЗЭТ в модели-бэнчмарке Chirp

# Список литературы

1. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Резванов Р. А., Африкян А. Н. Геофизические исследования скважин: Учеб. для вузов / под ред. д.г.-м.н. В. М. Добрынина, к.т.н. Н. Е. Лазуткиной – М.: ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 400 с.
2. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Ред. М. И. Эпов, Ю. Н. Антонов. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Издательство СО РАН, 2000. – 122 с.
3. Суродина И.В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // Математические заметки СВФУ – том 22 – № 2 – С. 51-61 – 2015
4. Surodina I. The GPU solvers for high-frequency induction logging // Numerical Analysis and Its Applications. 6th International Conference, NAA 2016 (Lozenetz, Bulgaria, June 15-22, 2016). Revised Selected Papers. (Lecture Notes in Computer Science 10187) – Springer Verlag – С. 640-647 – 2017
5. Суродина И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // Естественные и технические науки. – 2020. – № 12. – С. 131–134, doi: 10.25633/ETN.2020.12.17
6. Bittar, M., Klein, J., Beste, R., Hu, G., Wu, M., Pitcher, J., Golla, C., Althoff, G., Sitka, M., Minosyan, V., and M. Paulk. A New Azimuthal Deep-Reading Resistivity Tool for Geosteering and Advanced Formation Evaluation. *SPE Res Eval & Eng* 12 (2009): 270–279.

Благодарю за внимание!

Вопросы?