Решение некоторых задач геофизики на ресурсах ССКЦ (НКС1П и НКС-g6+GPU

С.н.с., к.ф.-м.н Суродина И.В.

11.03.21

Семинар **Высокопроизводительные вычисления**

Использование ресурсов НКС-1П

Задачи (новые, трёхмерные)

- Моделирование показаний зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ)
- Вертикальное «магнитное зондирование»
- Прямая (обратная) задача магниторазведки

(совместно с Глинским В.Н, Эповым М.И.)

Использование ресурсов НКС-g6 +GPU

- Поддерживаемые задачи, текущие расчёты новых моделей
- 3Д задача БКЗ+3Д задача ВИКИЗ – расчёты для АТЛАС МФМ
- 3д задача электротомографии
- 3д задача вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) (построение моделей новых районов, изучение разломов)

Идеология

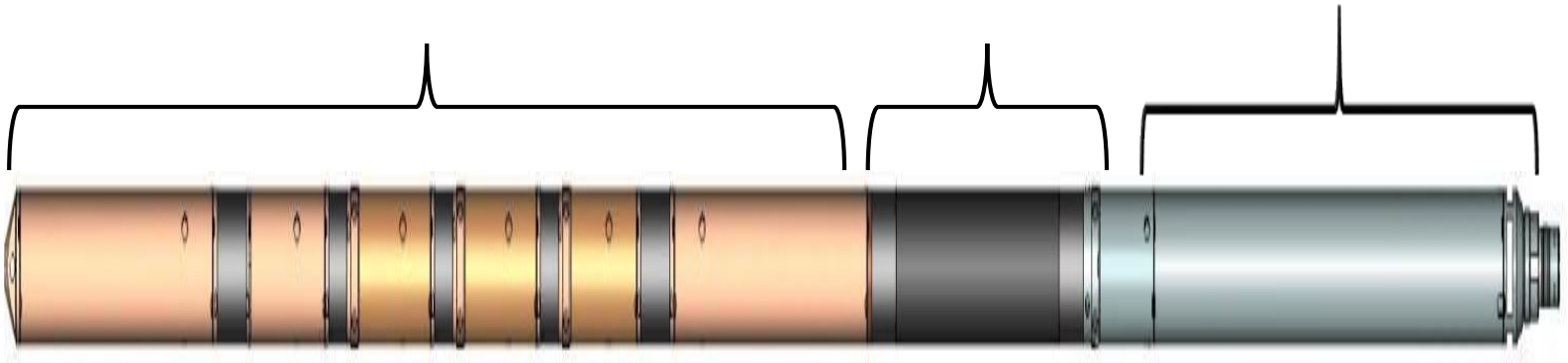
- Правильно поставить задачу
- Решить «как-то» правдоподобно
- Добиться точности расчётов в 1-2% в достаточно широком диапазоне геологических моделей
- Добиться надёжности алгоритмов
- Ускорение процессов решения (новые алгоритмы, новые методы и др.)

Зонд с тороидальными катушками

Генераторно-приёмная секция
D =76 мм
L = 2048 мм

Изолирующая проставка
D =76 мм
L = 500 мм

Модуль телеметрии
D =76 мм
L = 1124 мм



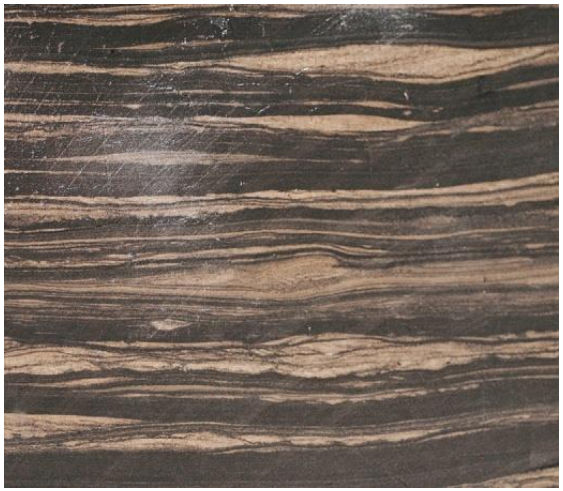
50, 100, 250 кГц

Грант РФФИ Теоретическое обоснование нового электромагнитного источника для задач промысловой и разведочной геофизики
(рук. член.-корр. Глинских В.Н., ИНГГ)

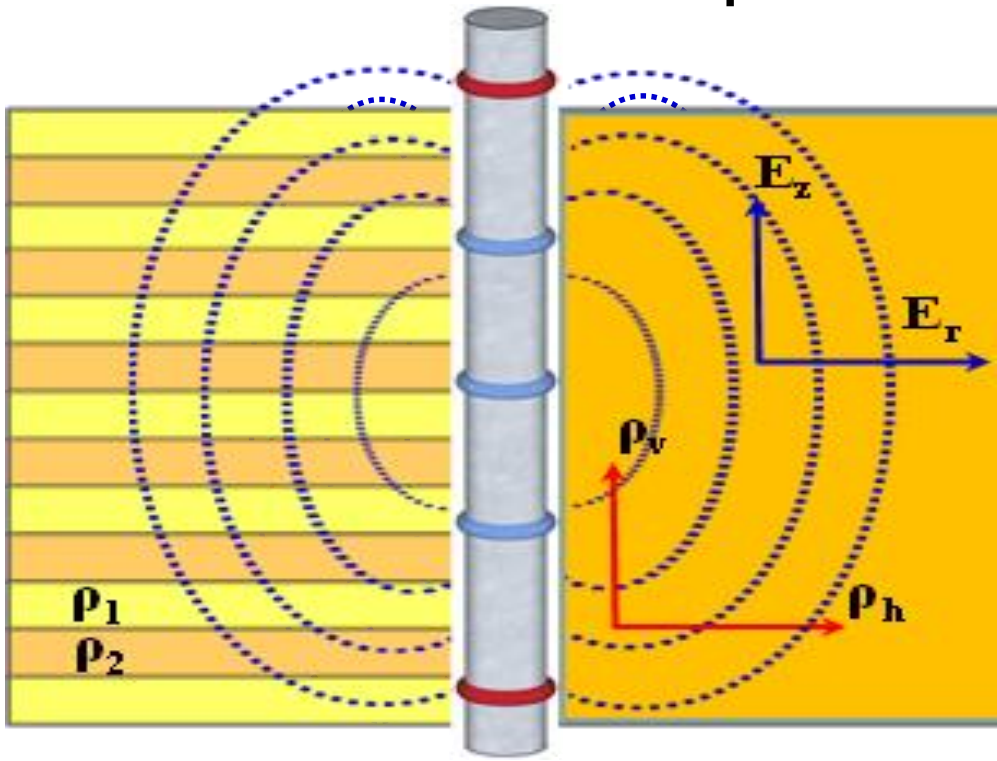
От тороидального источника на металлическом корпусе в геологической среде возбуждается переменное электрическое поле, которое имеет как горизонтальную, так и вертикальную компоненты. Вследствие этого регистрируемые сигналы зависят не только от горизонтального, но и от вертикального УЭС, пересекаемого скважиной пласта. Выполняются измерения реальной и мнимой частей плотности тока, протекающего по корпусу прибора. Прибор (ЗЭТ) разработан для изучения электрической макроанизотропии горных пород, определения характера насыщения пород-коллекторов, выделения тонкослоистых песчано-глинистых нефтенасыщенных интервалов и зон трещиноватости.

Электрическая макроанизотропия горных пород: возможности выявления и количественной оценки

Тонкое переслаивание песчаников и глин



[spec2000.net/17-speclam.htm]



Коэффициент электрической макроанизотропии:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_h}}$$

ρ_h – горизонтальное УЭС

ρ_v – вертикальное УЭС

- **В окружающей среде возбуждается переменное электрическое поле E, имеющее горизонтальную и вертикальную компоненты**
- **Это определяет зависимость измеряемых сигналов ЗЭТ от горизонтального и вертикального УЭС пласта**

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим случай проводящей немагнитной среды. Для амплитуд электрического и магнитного поля справедливы уравнения Максвелла

$$\begin{cases} rot\vec{H} = \sigma\vec{E} \\ rot\vec{E} = i\omega\mu\vec{H} - \vec{j} \end{cases}$$

$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$ – электропроводность

$\mu = \mu_0 = 4\pi\cdot10\text{^-}7$ – магнитная проницаемость

ω - циклическая частота

$\vec{j}$ - источник стороннего тока ,

цилиндрическая система координат

Источник поля в виде тороидальной катушки формально можно описать круговым магнитным током [Светов Б.С., 1984]

$$j_{\varphi}^{\mu} = -i\omega\mu M_{\varphi}\delta(z - z_0)\delta(r - r_0)$$

В осесимметричном случае анизотропной среды уравнения упрощаются

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial H_{\varphi}}{\partial z} = \sigma_z E_r \\ \dfrac{1}{r} H_{\varphi} + \dfrac{\partial H_{\varphi}}{\partial r} = \sigma_r E_z \\ \dfrac{\partial E_r}{\partial z} - \dfrac{\partial E_z}{\partial r} = i\omega\mu H_{\varphi} - j_{\varphi}^{\mu} \end{cases}$$

2Д моделирование

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\sigma_z}\frac{\partial H_\varphi}{\partial z}\right)-\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\sigma_r r}\frac{\partial (rH_\varphi)}{\partial r}\right)-i\omega\mu H_\varphi=-j_\varphi^\mu$$

$$\left|H_\varphi\right| \xrightarrow[r,z\to\infty]{} 0 \qquad\qquad H_\varphi\big|_{r=0}=0$$

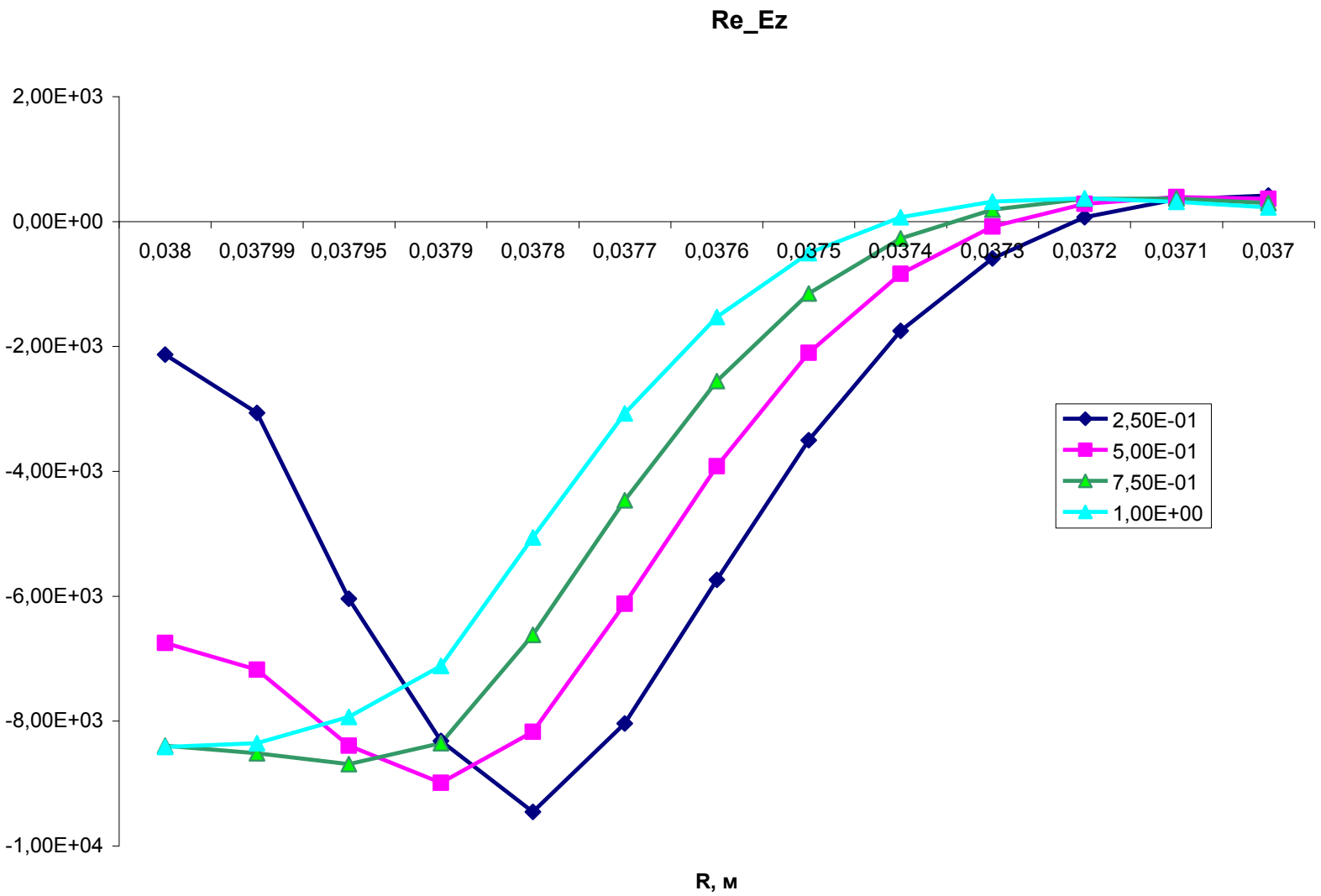
Имеем задачу Дирихле для компоненты H_φ

Конечно-разностная аппроксимация на неравномерной сетке, консервативная схема

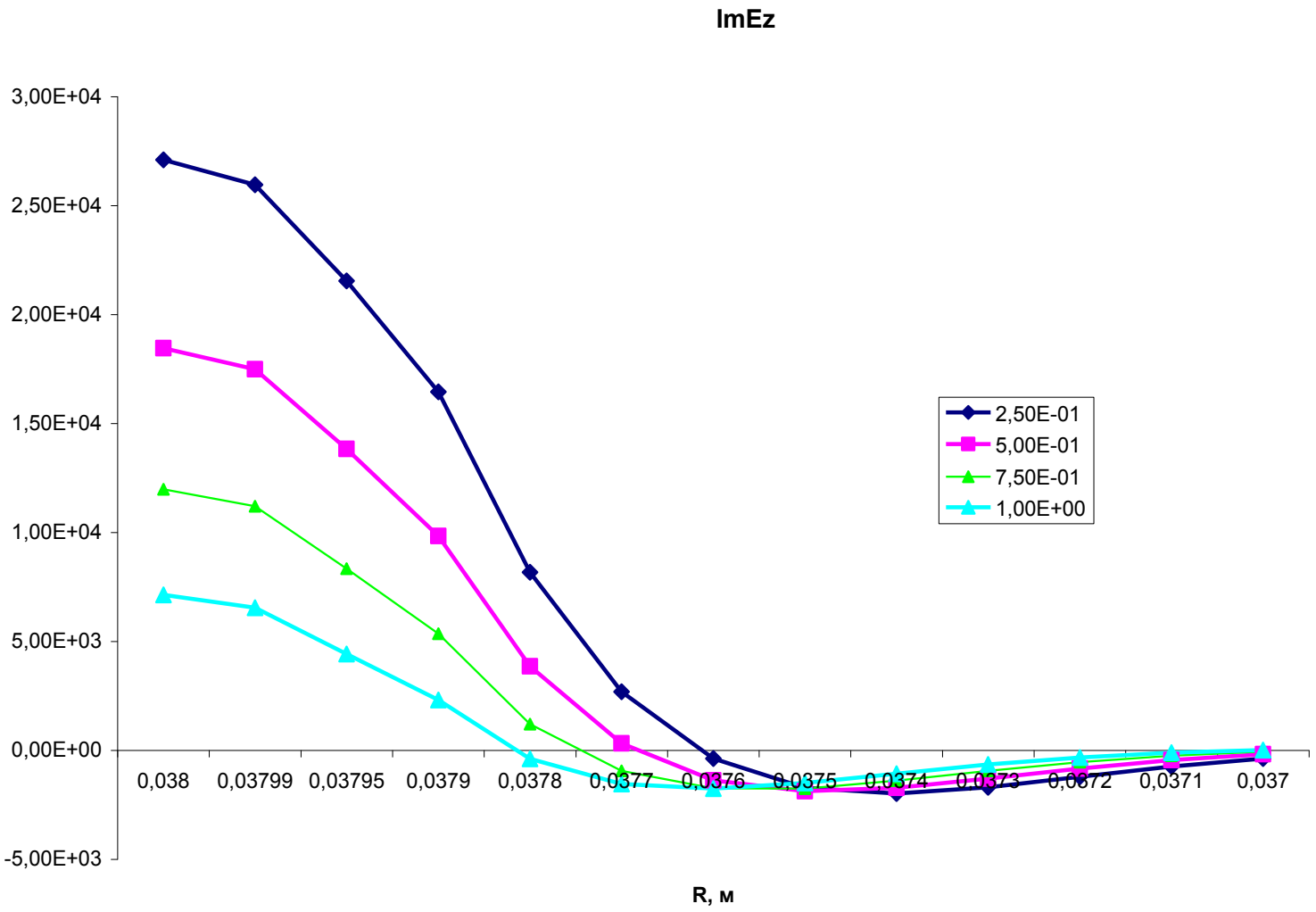
Тестирование

- Сравнение с 1D программой (2D)
- Вычисление компоненты E_z
- Итерационный метод (COCR на GPU)
- Прямой метод (PARDISO INTEL MKL)

1D, компонента Ez (Re)



1D, компонента Ez (Im)



Результат

- Создана программа
- Выявлено влияние длины корпуса на результирующий сигнал
- Вывод – к сожалению, выход на асимптотику (одномерным случай радиально-слоистой среды) на частоте 250 кГц после 10 метров , 50 кГц около 50 метров
- Программа стала основным инструментом для анализа поведения сигнала ЗЭТ в симметричных средах

Основные публикации

- Эпов М. И., Никитенко М. Н., Глинских В. Н. Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 1. С. 113–129.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Способ измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород. // Патент на изобретение № 2525149. Опубл. 10.08.2014. Бюл. № 22.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Манштейн А.К., Петров А.Н., Глинских В.Н. Устройство для измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород. // Патент на изобретение № 2528276. Опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Петров А.Н., Глинских В.Н., Суродина И.В., Киселев В.В.,Никитенко М.Н. Устройство для регистрации характеристик электромагнитного поля с использованием тороидальных катушек // Патент на изобретение № 2578774. Заявл. 14.01.2015; опубл.27.03.2016. Бюл. № 9.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Петров А.Н., Глинских В.Н., Суродина И.В., Киселев В.В. Устройство для генерации электромагнитного поля тороидальной катушкой в геологической среде // Патент на изобретение № 2579177. Заявл. 14.01.2015 г. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10
- Суродина И.В. Математическое моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками в двумерных изотропных моделях геологических сред. Интерэкспо Геосибирь-2018. Т. 2. № 4. С.162-170
- Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. ALGORITHMS OF DATA PROCESSING AND INVERSION FOR AN ELECTROMAGNETIC TOOL WITH TOROIDAL COILS WHEN STUDYING MACROANISOTROPIC PROPERTIES OF RESERVOIRS// BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY-GEO ASSETS ENGINEERING – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 187-197 , DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2139

3Д моделирование. Постановка задачи

$$-rot(\sigma^{-1} * rot\,\vec{H}) - i\omega\mu\vec{H} = -\vec{j}_{\varphi}^{\,\mu}$$

В изотропном случае принимая во внимание

$$div\vec{H} = 0$$

$$-\rho\Delta\vec{H} + grad\,\rho \times rot\vec{H} - i\omega\mu\vec{H} = -\vec{j}_{\varphi}^{\,\mu}$$

$$|H| \xrightarrow[r,z\to\infty]{} 0$$

$$\lim_{r\to 0} r\frac{\partial\vec{H}}{dr} = 0$$

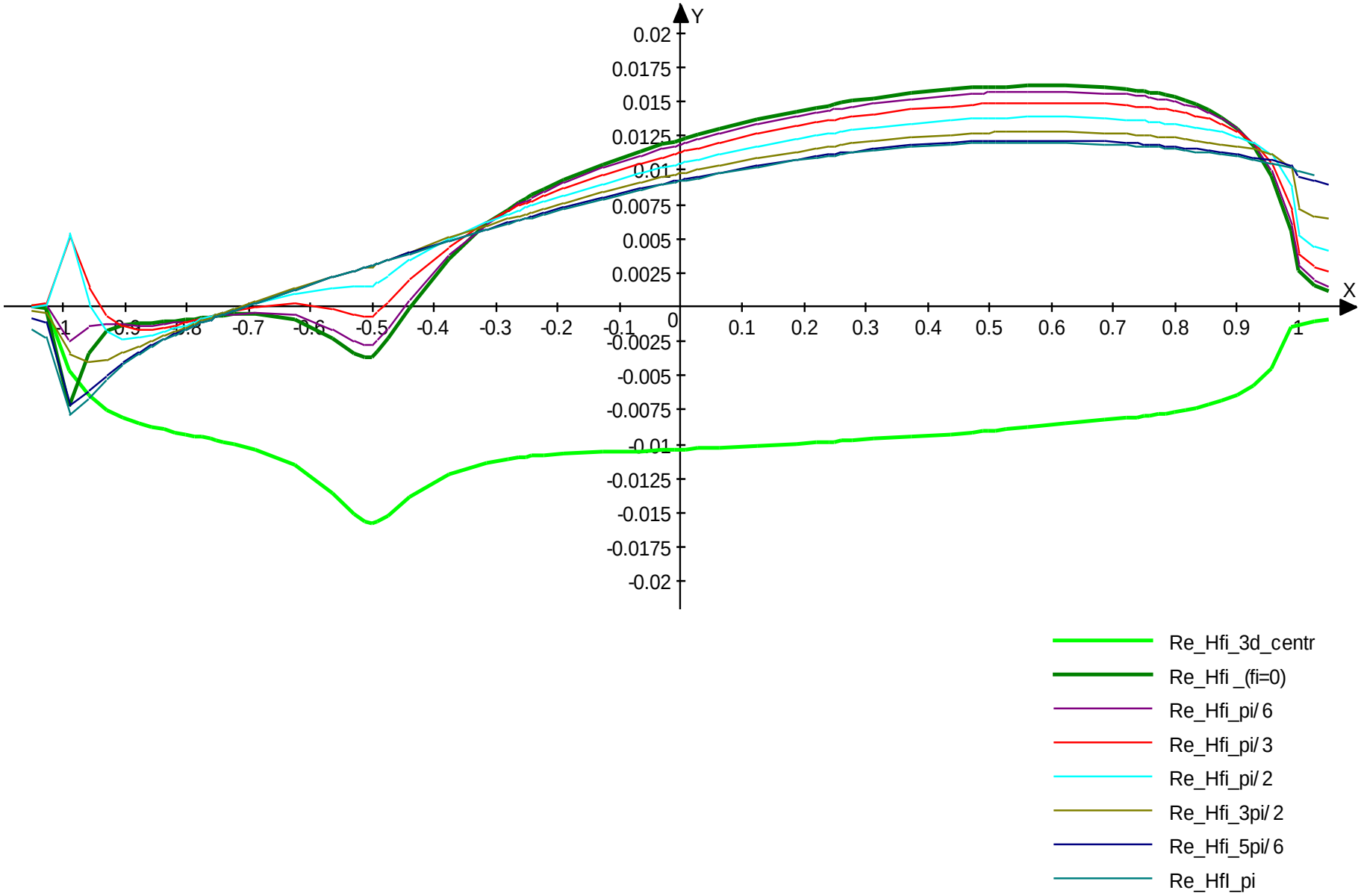
Условие периодичности $\vec{H}\,|_{\varphi=0} = \vec{H}\,|_{\varphi=2\pi}$

$$\begin{pmatrix} -\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\frac{\partial}{\partial z}\right)-\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\rho\frac{\partial}{\partial\varphi}\right)-\rho\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\rho\frac{\partial(r)}{\partial r}\right); & \frac{1}{r^2}\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\frac{\partial(r)}{\partial r}+\frac{2\rho}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}; & \frac{\partial\rho}{\partial z}\frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{1}{r}\frac{\partial\rho}{\partial r}\frac{\partial}{\partial\varphi}-\frac{2\rho}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}; & -\frac{\partial}{\partial z}\rho\frac{\partial}{\partial z}-\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\rho}{r}\frac{\partial(r)}{\partial r}\right)-\frac{\rho}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}; & \frac{1}{r}\frac{\partial\rho}{\partial z}\frac{\partial}{\partial\varphi} \\ \frac{\partial\rho}{\partial r}\frac{\partial}{\partial z}; & \frac{1}{r}\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}\frac{\partial}{\partial z}; & -\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\rho\frac{\partial}{\partial\varphi}\right)-\frac{1}{r}\frac{\partial(r)}{\partial r}\left(\rho\frac{\partial}{\partial r}\right)-\rho\frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} H_r \\ H_\varphi \\ H_z \end{pmatrix}$$

$$-i\omega\mu * \begin{pmatrix} H_r \\ H_\varphi \\ H_z \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} 0 \\ j_\varphi^\mu \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\left|H\right| \xrightarrow[r,z\to\infty]{} 0 \qquad \lim_{r\to 0} r\frac{\partial\vec{H}}{dr} = 0$$ (ограниченное решение при $r = 0$)

Re(Hfi), зонд сдвинут на стенку скважины



Выполненные этапы

- Отладка, тестирование, выбор расчётной сетки +

  Сетка (90*36*190), размер матрицы 1846800 x 1846800

  Время расчёта 1 точки профиля (32 ядра BROADWELL) ~ 15 мин (второй генератор почти бесплатно)

Сейчас выполняется

- Масштабное моделирование для типичных моделей

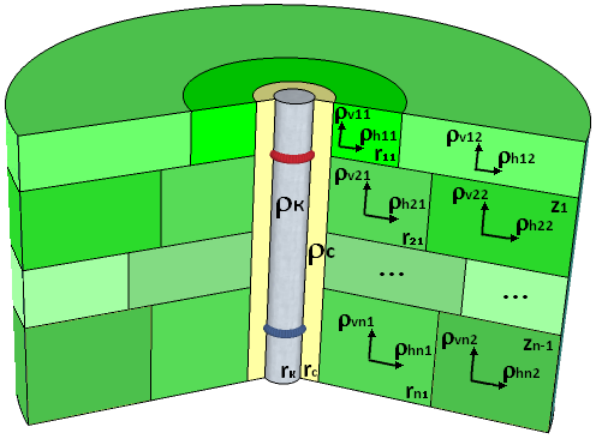
  Что это даёт (в перспективе):

- Новый инструмент для изучения разрезов широко применяемых наклонно-горизонтальных скважин, включая маломощные пласты с высоким электрическим контрастом по сравнению с вмещающими породами.
- Изучение тонкослоистых электрически анизотропных коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами.
- Дополнительный (физически отличающийся от традиционных) метод электромагнитной геонавигации наклонно-горизонтальных скважин.

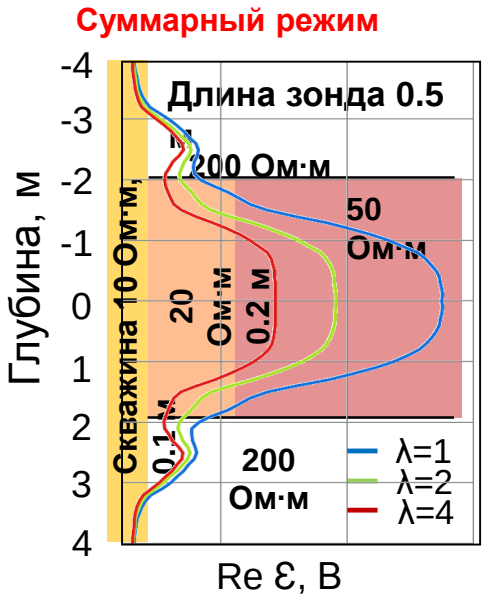
Где используется

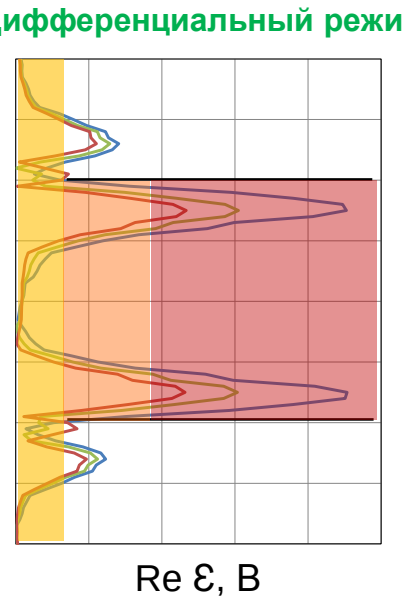
- 2Д моделирование

Двумерное моделирование сигналов ЗЭТ в анизотропных геоэлектрических моделях



Двумерная анизотропная модель

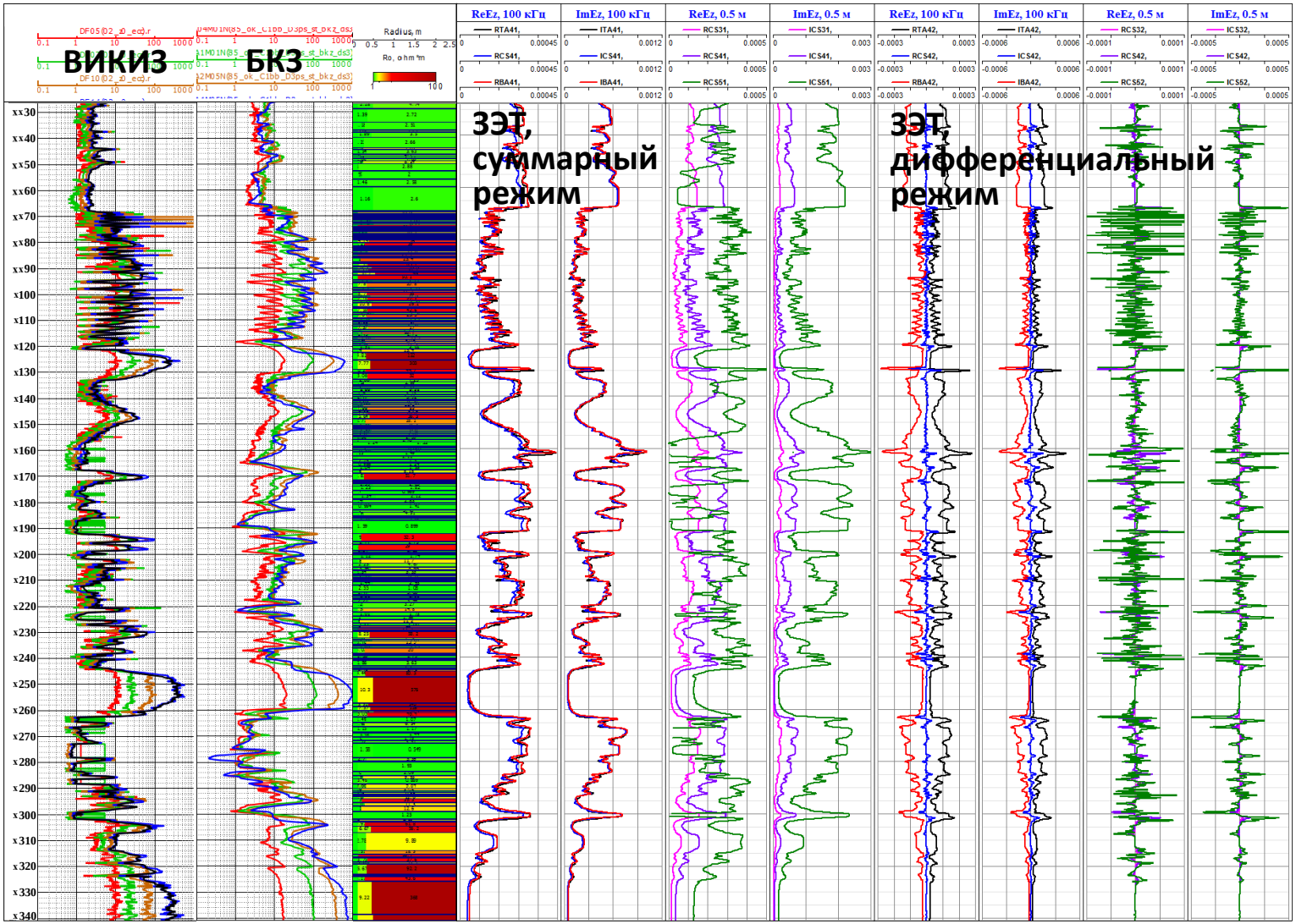




Трещиноватый карбонатный коллектор, раствор на нефтяной основе

- **Диаграммы отражают типичные геоэлектрические условия флюидонасыщенных коллекторов и особенности перехода через границы**
- **Это справедливо для всех рассмотренных частот и различных контрастов электрофизических параметров**
- **Однозначная связь сигналов суммарного и дифференциального режимов с коэффициентом электрической макроанизотропии**

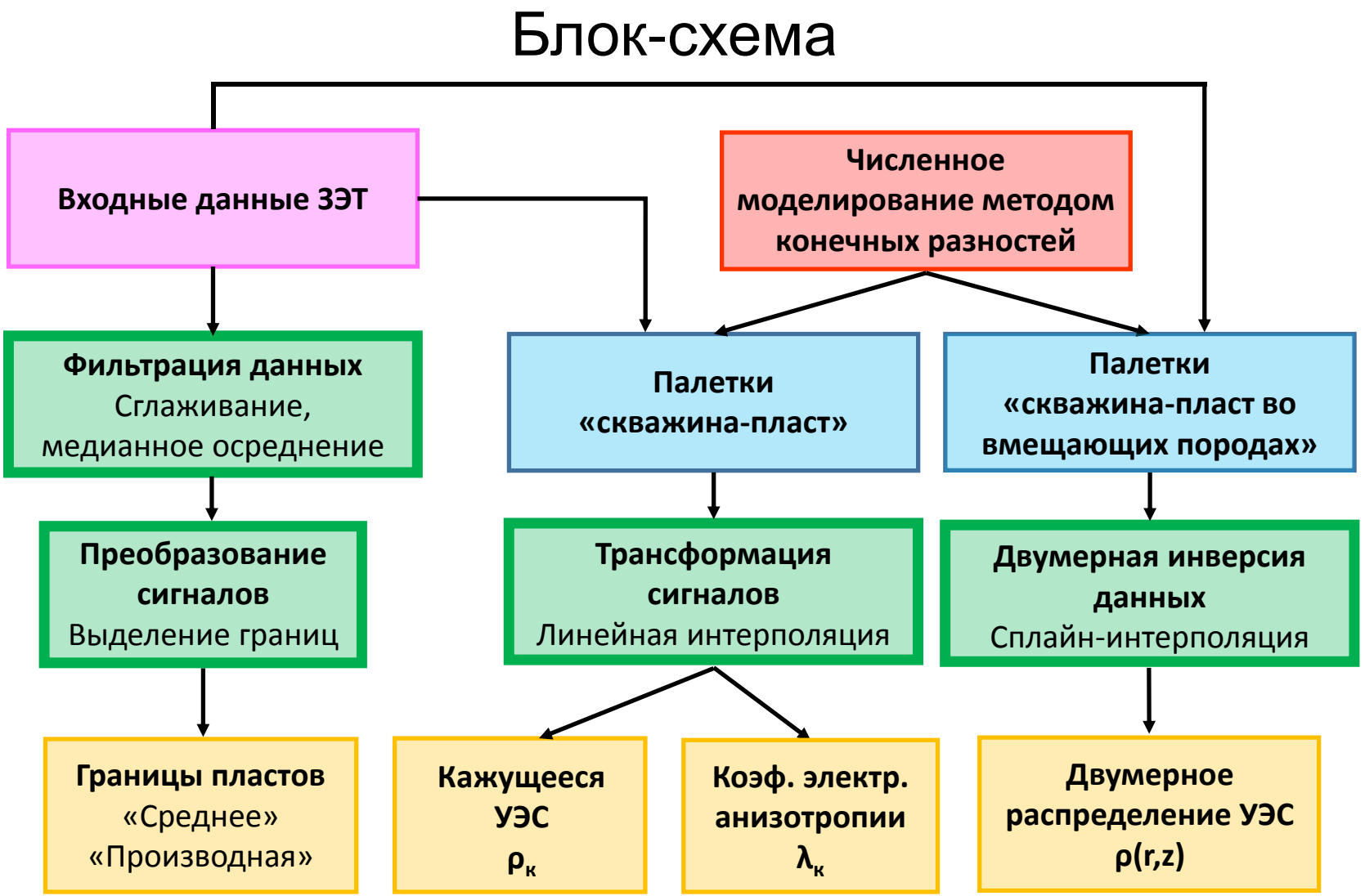
Численное двумерное моделирование сигналов ЗЭТ в реалистичных геоэлектрических моделях коллекторов



- Высокая степень дифференциации диаграмм в суммарном и дифференциальном режимах;
- Минимальные значения сигналов суммарного режима – в известняках, максимальные – в терригенных породах;
- Сигналы дифференциального режима для расстояний 0.25 м и 0.75 м симметричны;
- Данные ЗЭТ отражают сложное строение геологического разреза.

- Геоэлектрическая модель получена при совместной двумерной инверсии данных ВИКИЗ и БКЗ с помощью разработанного алгоритма;
- Численное моделирование сигналов ЗЭТ – по программе И.В. Суродиной.

Алгоритмы обработки и двумерной инверсии данных ЗЭТ



Прямая задача магниторазведки

$$div\ gradU = -div\vec{I}$$

$$div\,(\mu \cdot gradU) = -div\vec{I}_n$$

$$\vec{I} = \kappa\vec{H} + \vec{I}_n$$

κ – *безразмерная магнитная восприимчивость,*

$\vec{I}_n$ – *вектор естественной остаточной намагниченности*

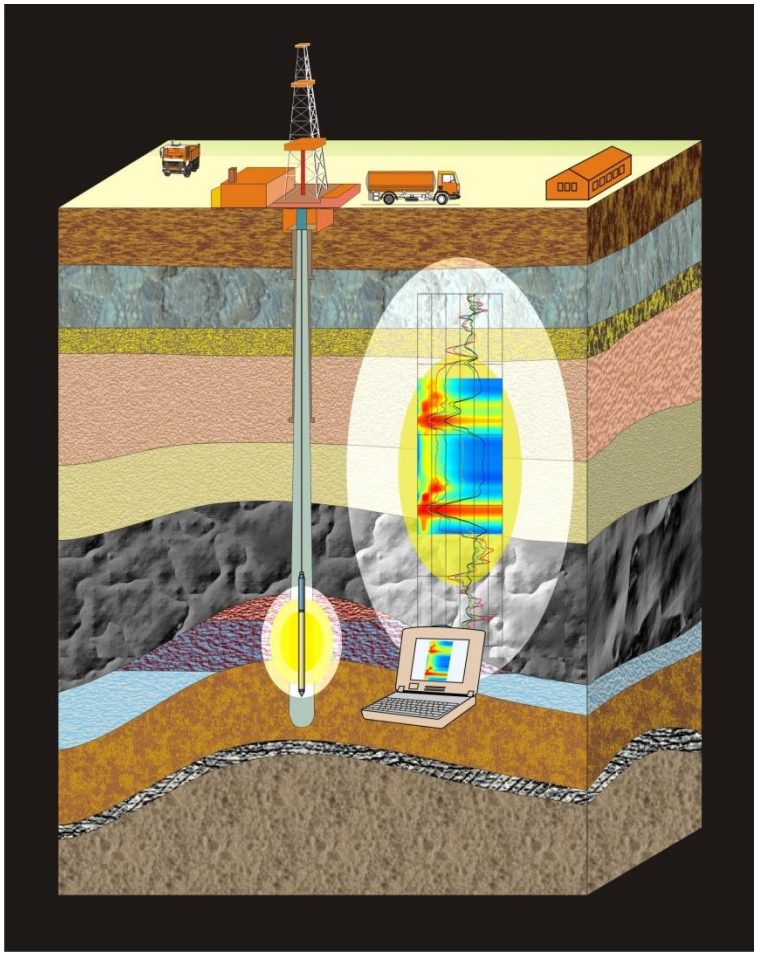
$\vec{I}$ – *намагниченность в рассматриваемой точке a.*

(*система СИ*)

Использование ресурсов НКС-g6 +GPU

- Трёхмерное моделирование показаний зондов БКЗ
- ВЭЗ
- Электротомография
  Быстрый расчёт потенциала точечного источника в сложно-построенной среде
- Трёхмерное моделирование показаний зондов ВИКИЗ

Боковое каротажное зондирование

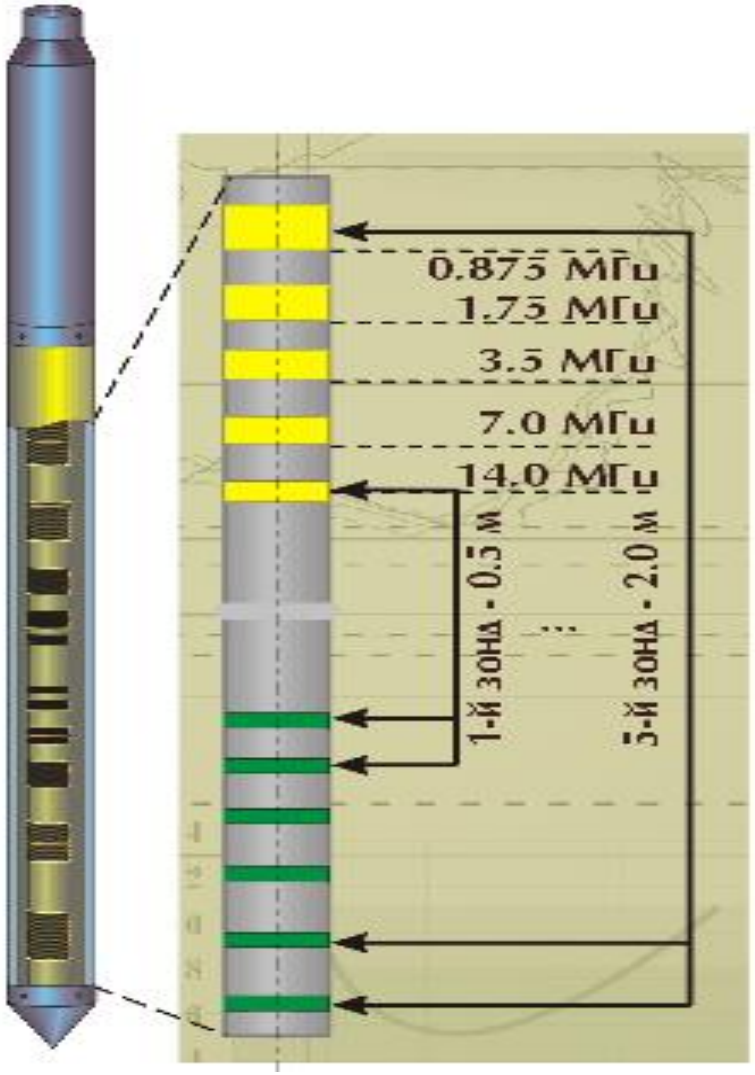




GZ1 – A0,4M0,1N
GZ2 – A1M0,1N
GZ3 – A2M0,5N
GZK – N0,5M2A
GZ4 – A4M0,5N



Зонды ВИКИЗ





- Уравнение Пуассона в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{r}\left(\sigma r\frac{\partial U^a}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{r}\left(\sigma\frac{\partial U^a}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma\frac{\partial U^a}{\partial z}\right)=$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{r}\left((\sigma_0-\sigma)r\frac{\partial U^0}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{r}\left((\sigma_0-\sigma)\frac{\partial U^0}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left((\sigma_0-\sigma)\frac{\partial U^0}{\partial z}\right)$$

$$U^0=\frac{I}{4\pi\sigma_0 R} \qquad U^0(r,z,d)=\frac{I}{2\pi^2\sigma_0 R}\int_0^\infty J_0(mr)J_0(md)e^{-mr}dm \qquad R=\sqrt{r^2+z^2}$$

$$U^a\Big|_{r=\mathbf{R}}=0 \qquad U^a\Big|_{z=\pm\mathbf{Z}}=0 \qquad \partial U/\partial r\Big|_{r=0}=0$$

3D VIKIZ

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

$$E_x^0 = -\frac{i\omega\mu M}{4\pi R^2} \cdot \frac{y}{R}(1 + k_0 R) e^{-k_0 R}$$

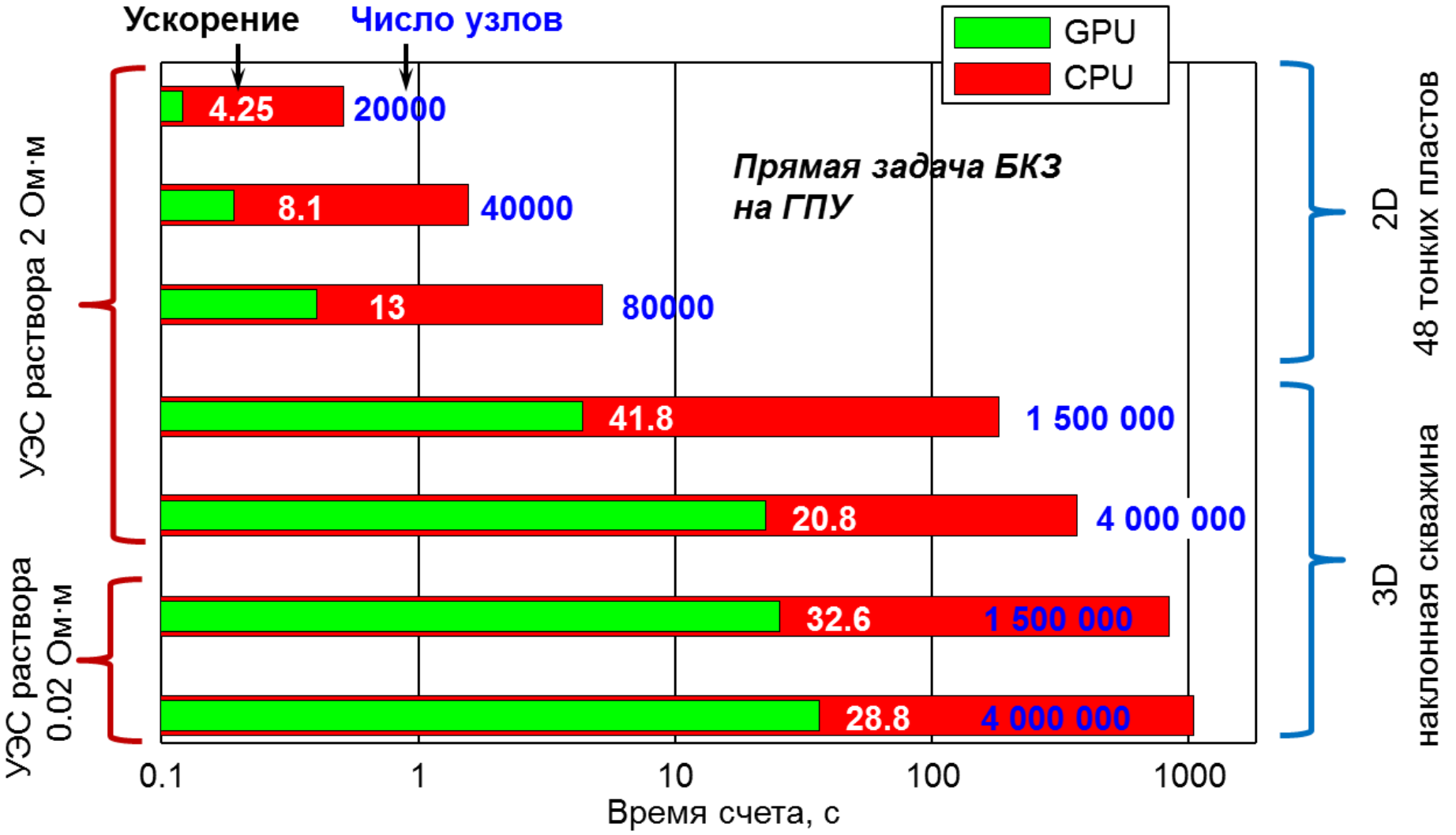
$$E_y^0 = -\frac{i\omega\mu M}{4\pi R^2} \cdot \frac{x}{R}(1 + k_0 R) e^{-k_0 R} \qquad E_z^0 = 0$$

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

Метод решения 2D и 3D задач

- Конечно-разностная аппроксимация
- Симметризация СЛАУ (алгоритм Ю.И.Кузнецова)
- Метод сопряженных градиентов (или COCR)
- Предобуславливатель SSOR или AINV + предварительная нормировка матрицы
- GPU реализация – AINV предобуславливатель на основе алгоритма Хотеллинга

Производительность вычислений на GPU при численном решении 2 и 3D прямых задач БКЗ



Сравнение с CUSPARSE, PARDISO

method	N=17139		N=37846		N=76136	
	iterations	time,sec	iterations	time,sec	iterations	time,sec
D3(D1)	521	0.076	834	0.18	1190	0.35
Cusparse	96	0.7	160	1.92	212	4.46

расчёт в 1 точке – решение СЛАУ (БКЗ)

GPU: NVIDIA® Tesla M 2090, single precision

БК32Д, профилирование, 155 точек общее время решения всей задачи

метод	N=17139	N=37848	N=76136
CG(D3)(GPU)	13 сек (*)	22 сек (*)	39 сек (*)
Pardiso (CPU)	13 сек	29 сек	66 сек

GPU: NVIDIA® Tesla M 2090

- * На инициализацию видеокарты на кластере НКС-30Т затрачивается 7-8 секунд

Викиз 2D, расчёт в 1 точке – решение СЛАУ

	14469		**17819**		**18795**		**18849**		**61065**	
	iter	time	iter	time	iter	time	iter	time	iter	time
D0	1925	0.3	1100	0.15	1078	0.16	1008	0.15	1061	0.33
D1	1016	0.22	554	0.10	538	0.12	499	0.10	521	0.24
D2	712	0.24	399	0.12	372	0.13	366	0.12	376	0.31
cusparse	178	1.65	294	2.95	254	2.65	233	2.66	188	4.22
Pardiso		0.14		0.11		0.10		0.10		0.4

ЗД БКЗ

метод	N=857480		N=1458600	
	Число итераций	Время, сек	Число итераций	Время, сек
CG(scal)	1816	1.45	2463	3.09
D1	877	0.96	1203	2.09
D2(D1)	606	1.07	846	2.39

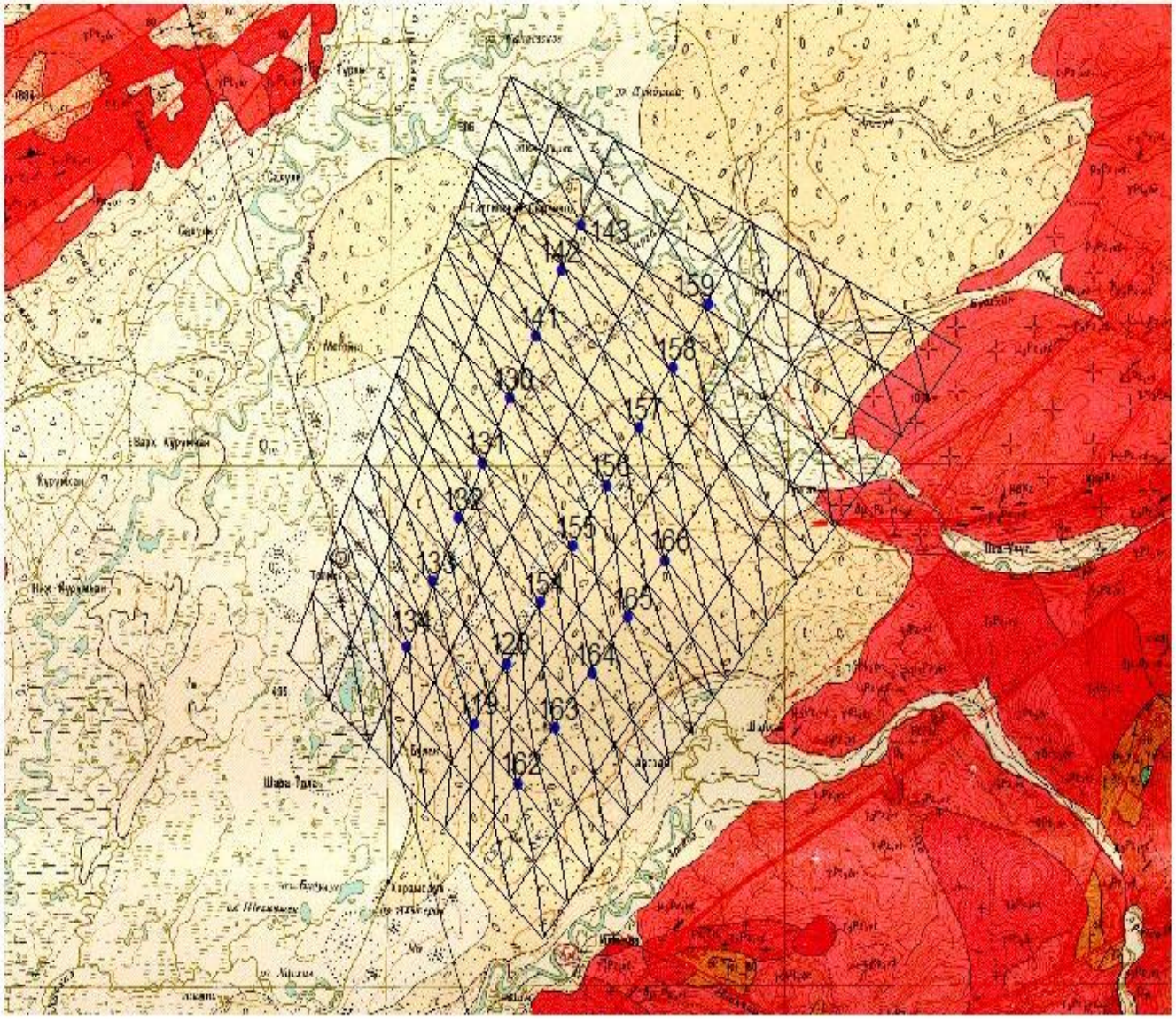
N=1 500 000
CG(D1) – 4.55 сек
Pardiso - 732 сек

Вертикальное электрическое зондирование

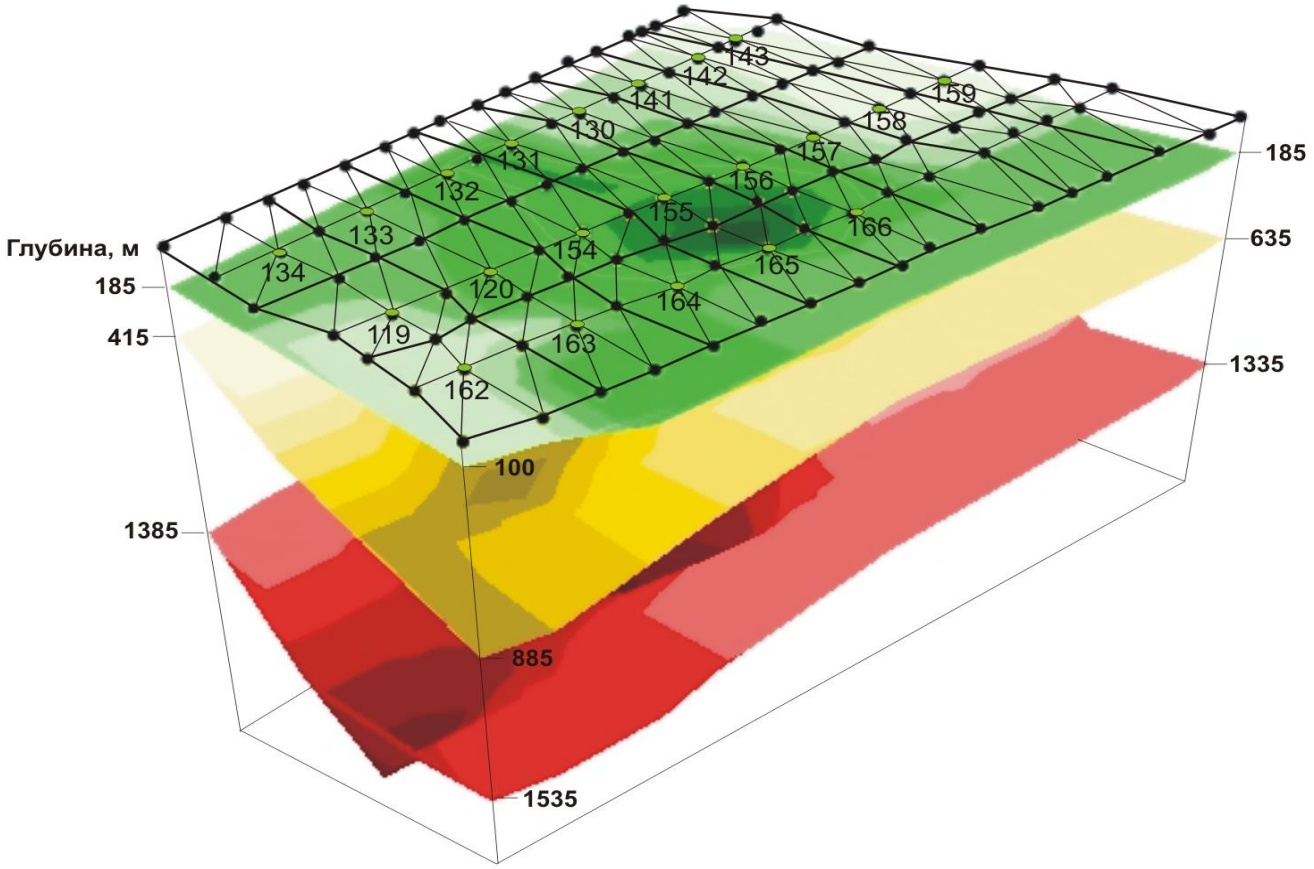
- Установка Шлюмберже AMNB

Разносы AB (токовые электроды)от 1.5 м до 16 км, MN~1/10 от AB

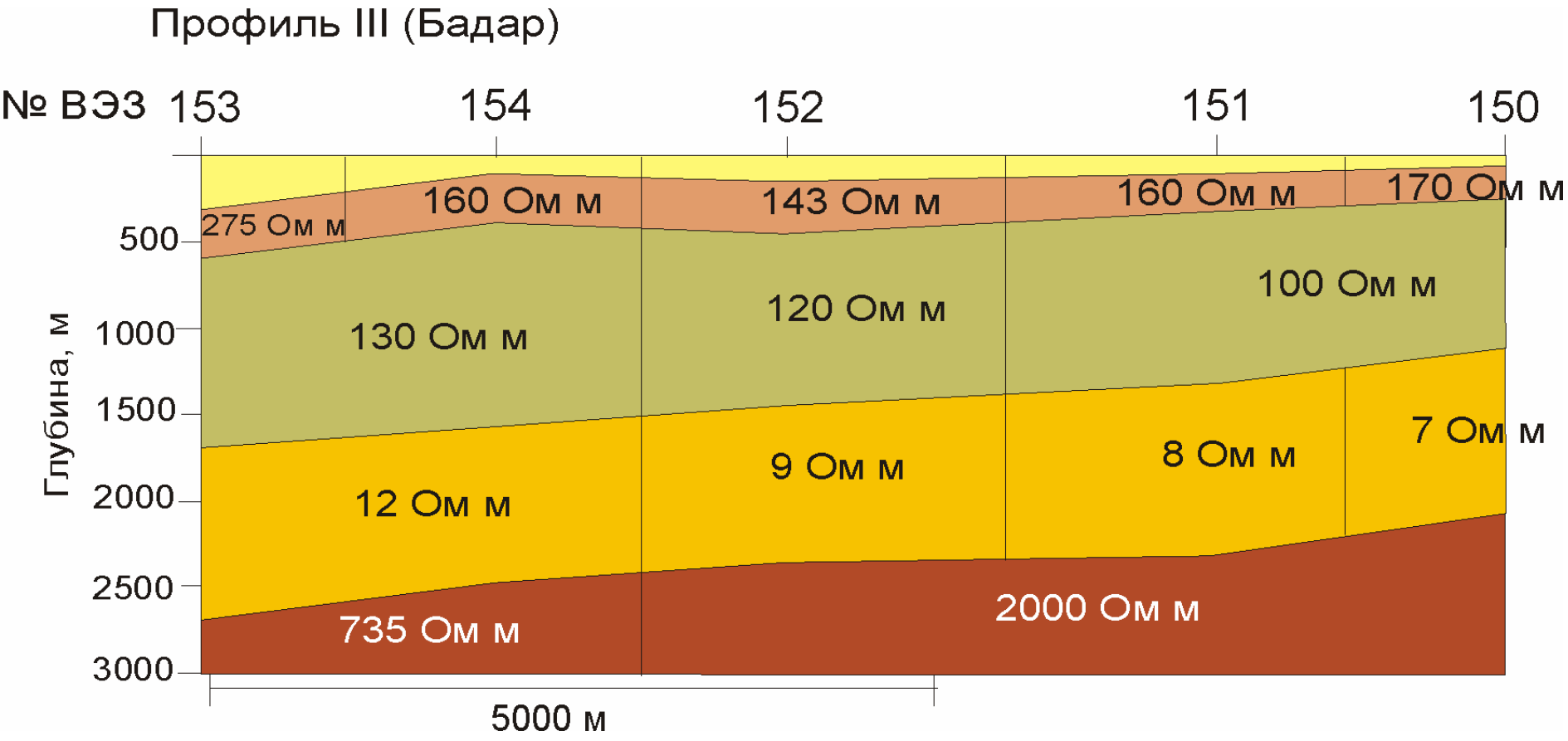
Группировка нескольких разносов на одной сетке. Расчёт группы разносносов (6 разносов одновременно) – на 12 потоках. (1 узел G7q) или 12 GPU – 4 узла SLg. На расчёт профиля (8-10 точек) уходит несколько минут (от 2-7). Использование MPI технологии.


143
142
159
141
158
130
157
131
156
132
155
166
133
154
165
134
120
164
119
163
162
N
Пункты ВЭЗ
10
0
10
20 Kilometers

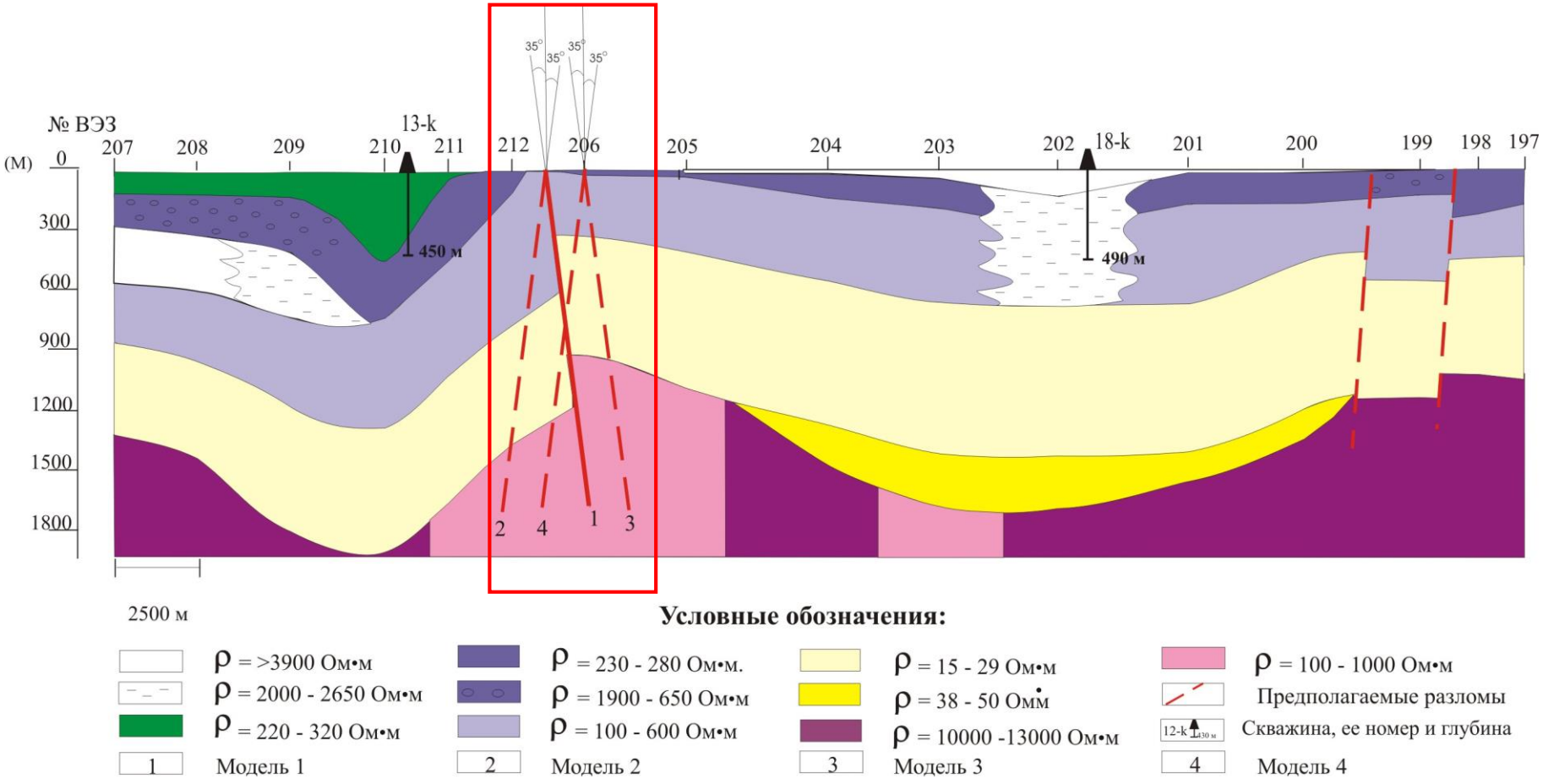
3D модель Верхнего куйтуна Баргузинской впадины



Геоэлектрический разрез по профилю III (Тункинская впадина)



3D моделирование разломной структуры. Профиль IX, Баргузинская впадина

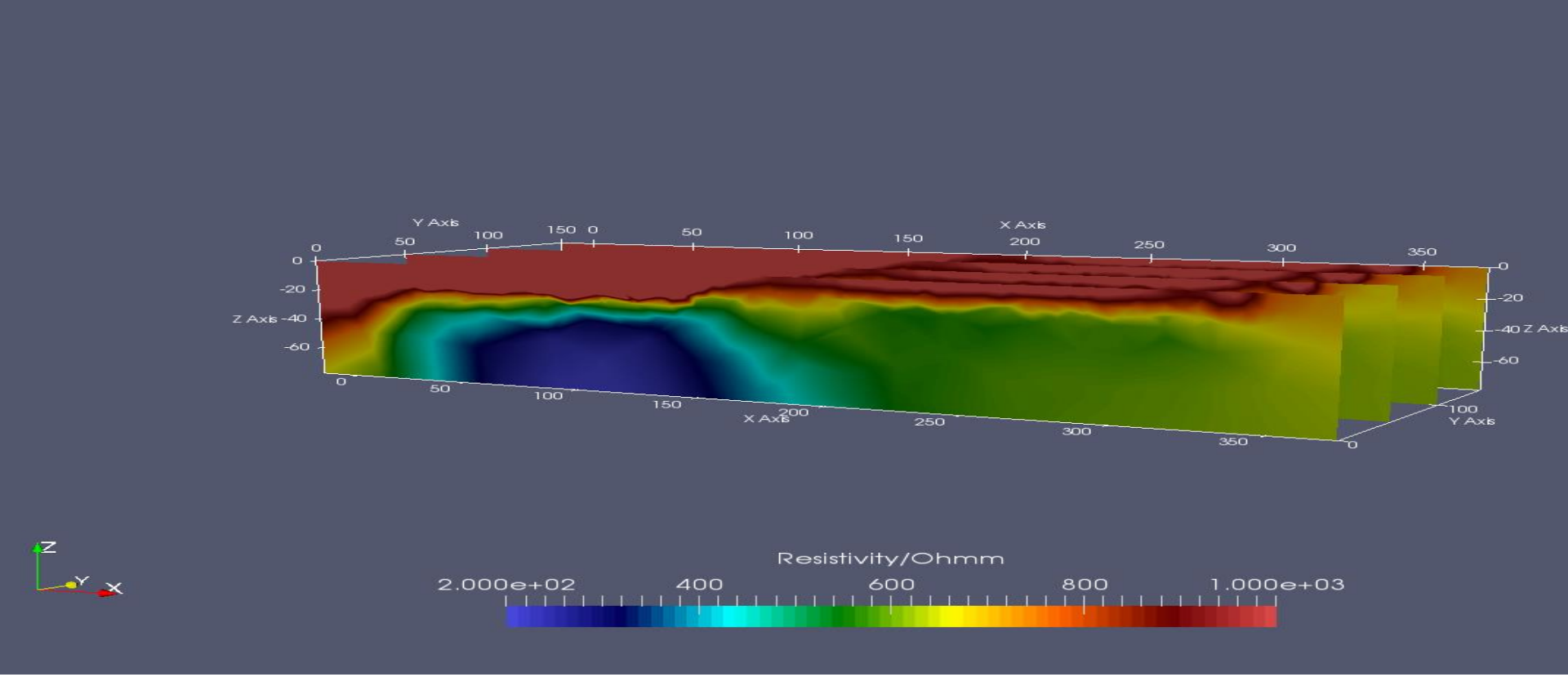


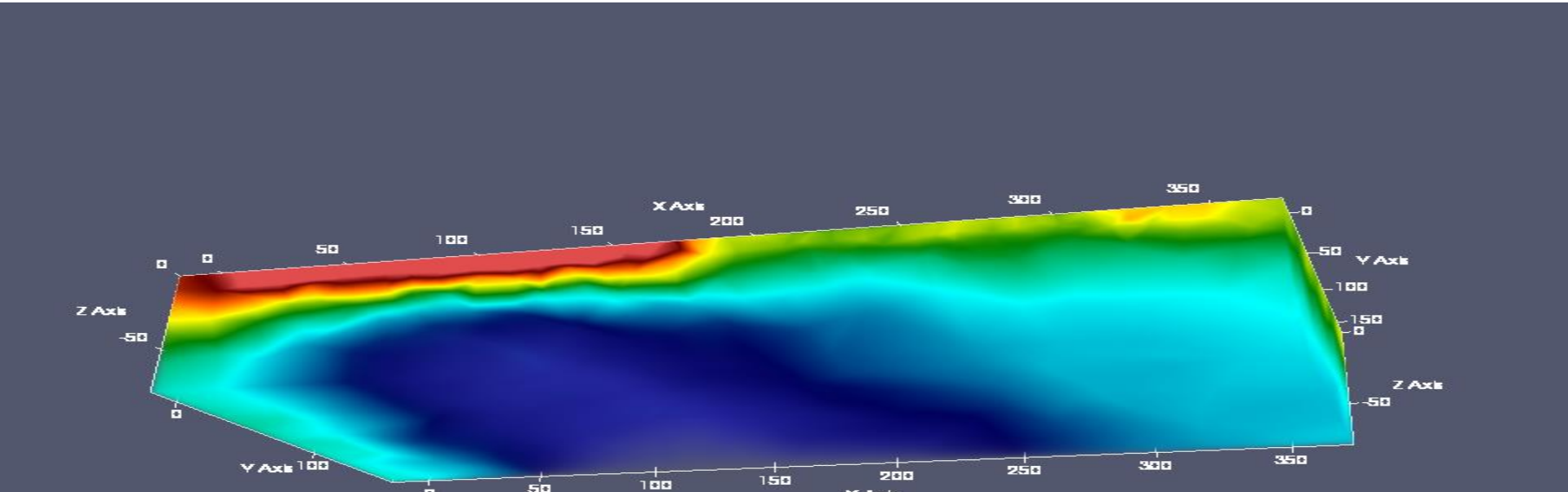
Расчёты в этом году

- Создана модель района Ештикёль
- Без учёта разлома
- С учётом разлома
- Рассчитаны кривые кажущегося сопротивления
- Готовится статья совместно с (Неведровой Н.Н. и Санчаа А.М.)

Электротомография

- 1.Последовательно решается 48 задач (+48, если нужен нагоняющий профиль)
- 2. В приёмных точках (в зависимости от разноса) вычисляется кажущееся сопротивление
- 1 GPU, можно решать на ноутбуке с графической картой
- Расчёт моделей района Курайской впадины

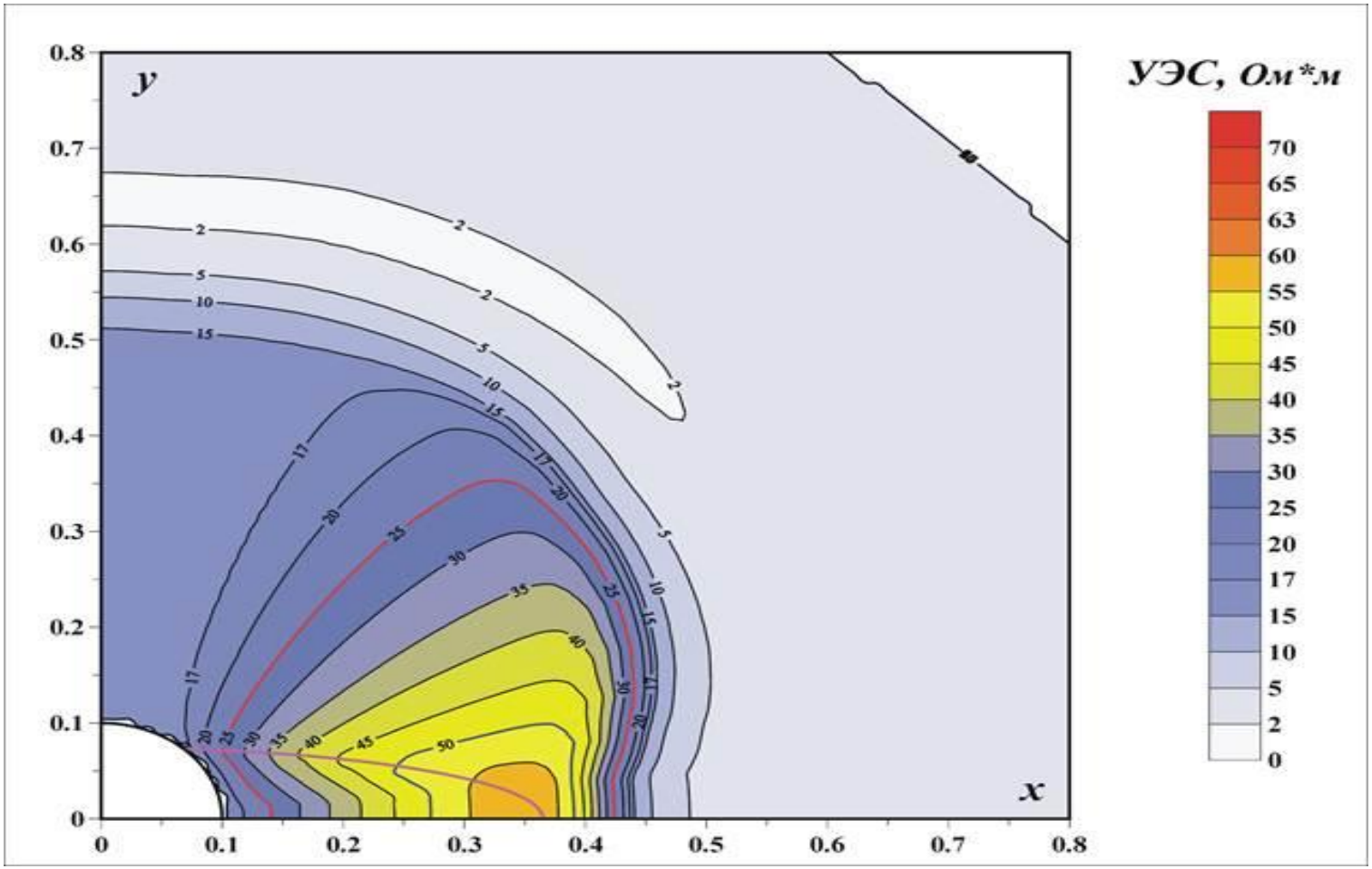

Y Axis
X Axis
Z Axis
Resistivity/Ohmm
2.000e+02
400
600
800
1.000e+03
Z
Y
X


X Axis
Y Axis
Z Axis

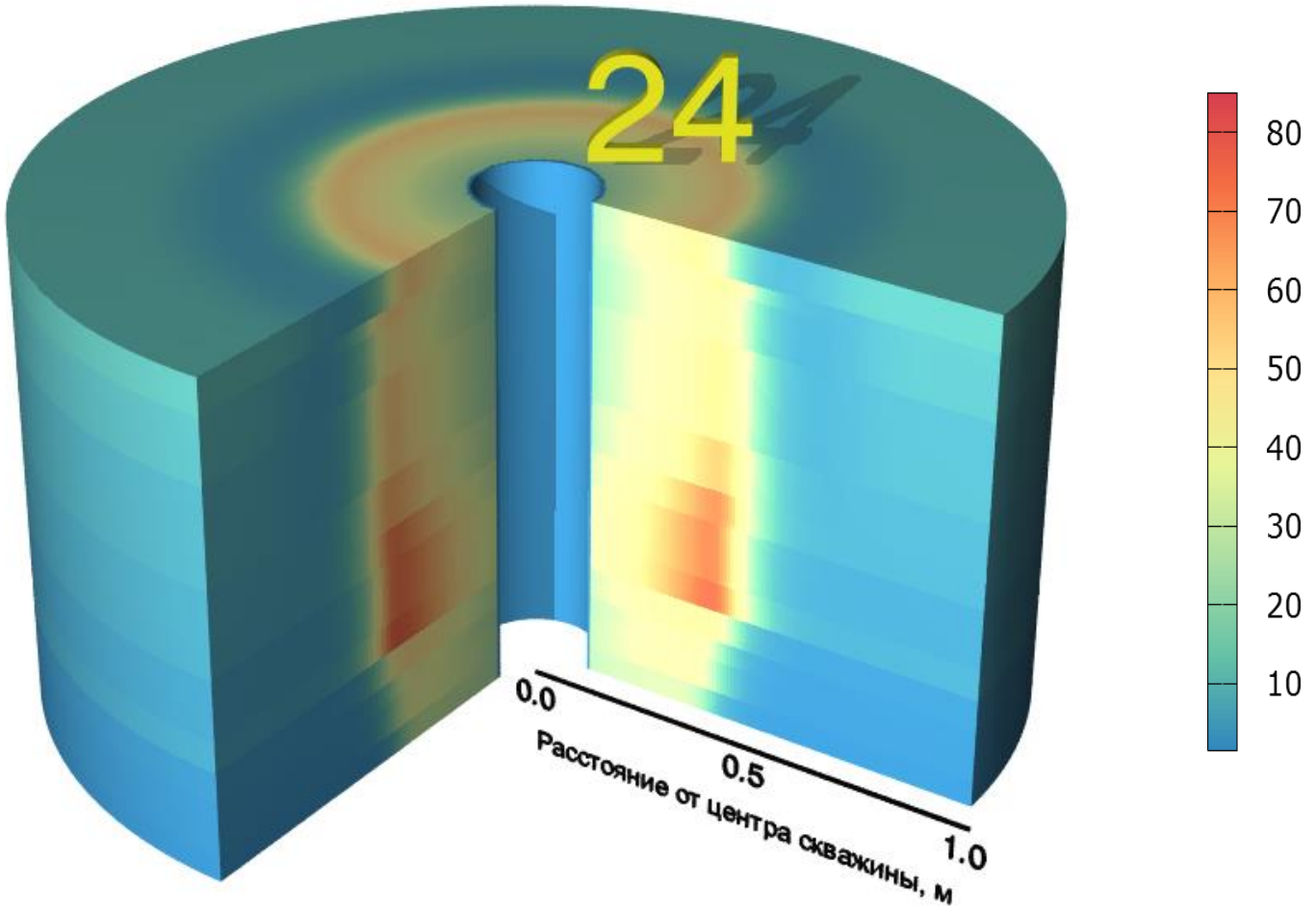
3д БКЗ+3д ВИКИЗ (нкс-g6+GPU)

- Расчёты для пополнения базы многофизичных моделей (МФМ) типичных пластов-коллекторов АТЛАС МФМ (систематизированное множество, постоянно пополняемое для поступающих данных по месторождениям Западной Сибири). АТЛАС МФМ может быть использован для оценки влияния параметров модели на процесс проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, сигналы электромагнитного каротажа и интерпретации данных геофизических и геолого-технологических исследований скважины на основе многофизичного моделирования (совместно с Нестеровой Г.В)

Модель, учитывающая геомеханические изменения в околоскважинном пространстве



Зависимость модели (удельное электрическое сопротивление) от глубины



Использование быстрых 2d программ: Совместная двумерная инверсия данных индукционного и гальванического каротажа

Основные особенности:

•одновременно измеренные данные ВИКИЗ и БКЗ;

•двумерная интерпретационная модель;

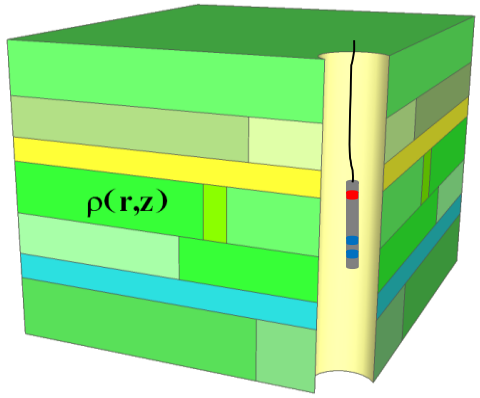
•численные решения прямых двумерных задач методом конечных разностей [И.В. Суродина];

•двухэтапная численная инверсия;

•оптимизационный метод прямого поиска;

•оконный подход к инверсии.

Двумерная геоэлектрическая модель среды




Спасибо за внимание!

Алгоритм Хотеллинга-Шульца

$D_0 -$ начальное приближение обратной матрицы

Пусть, $R_0 = E - AD_0$, если $\|R_0\| \leq q \leq 1$, то строим итерационный процесс

$D_1 = D_0(E + R_0), R_1 = E - AD_1$

$D_2 = D_1(E + R_1), R_2 = E - AD_2$

.....

.....

$D_m = D_{m-1}(E + R_{m-1}), R_m = E - AD_m$

$$\|D_m - A^{-1}\| \leq \|D_0\| \frac{q^{2^m}}{1-q}$$

Если $A = A^T$ и $D_0 = {D_0}^T$, то $D_m = {D_m}^T$

G. Schulz, Iterative Berechnung der reziproken Matrix, Z. Angew, Math. Mech. 13 (1933)

H. Hotelling, Analysis of a complex of statistical variables into principal components, J.Educ.Psych.,(1933)

В.Н. Фаддеева, Д.К.Фаддеев.Вычислительные методы линейной алгебры. Физматгиз, Москва, 1963.

Построение предобуславливателей D1

$$D_1 = D_0 + D_0\ (I - AD_0)$$

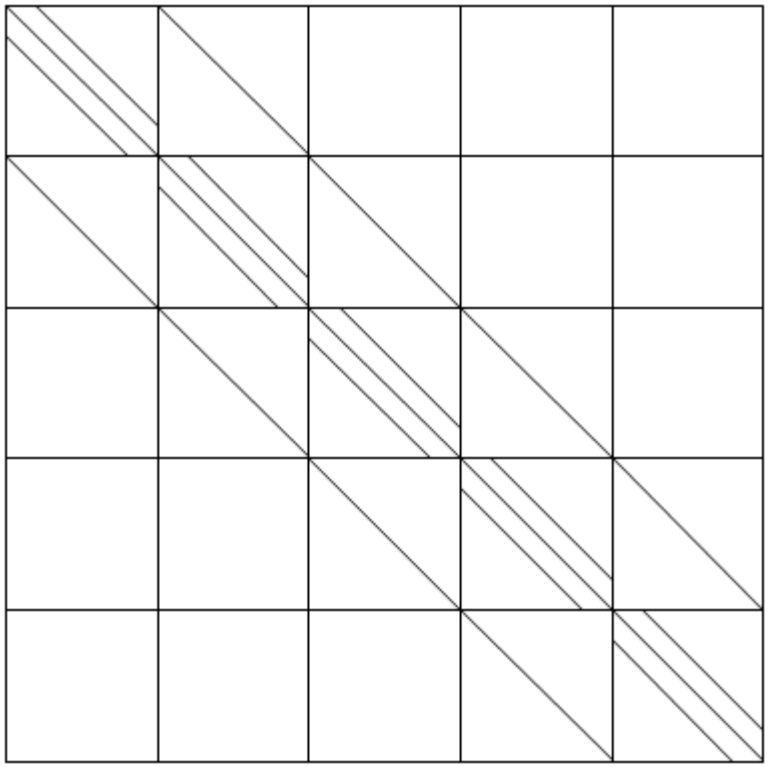
$$d_1^3[\mathrm{i}] = 1 \Big/ a^3[\mathrm{i}]$$

$$d_1^4[\mathrm{i}] = -a^4[\mathrm{i}] \Big/ (a^3[\mathrm{i}+1] * a^3[\mathrm{i}])$$

$$d_1^5[\mathrm{i}] = -a^5[\mathrm{i}] \Big/ (a^3[\mathrm{i}+1] * a^3[\mathrm{i}])$$

d_1^i - ith diagonal of D_1

a^i - ith diagonal of A



D_1 has the same structure as A

5 *diagonals for 2D*

7 *diagonals for 3D*

Reuse *of the SpMV for matrix A*