

Каскадная инверсия магнитного поля с выделением индуктивной и остаточной составляющих вектора суммарной намагниченности

А. Давыденко

Иркутский государственный университет



Siberian School of Geosciences
Иркутский национальный исследовательский
технический университет

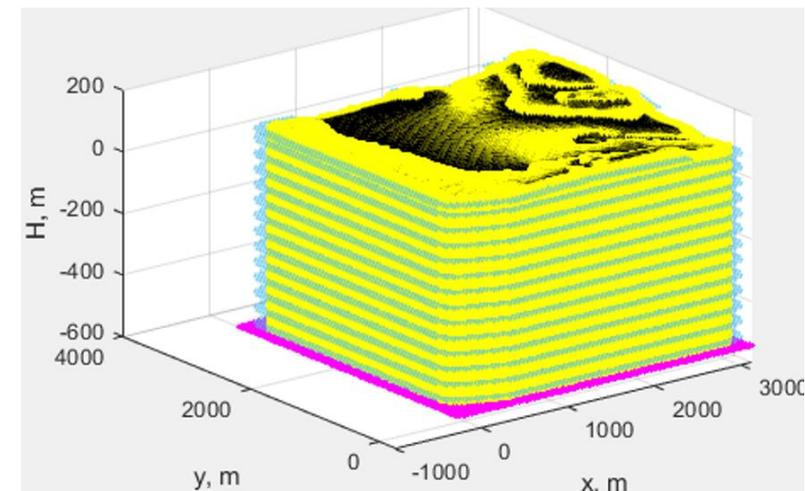


Интерпретационные модели и каскадная инверсия

- Представления о физических и геометрических параметрах неоднородностей геологической среды, получаемые в виде моделей по результатам инверсии геофизических полей, являются основой для геологической интерпретации результатов геофизических исследований.
- Результатами современных гравиметрических и магнитных съемок являются высокоточные данные высокой плотности на больших площадях, характеризующихся, как правило, существенной изменчивостью геолого-геофизических обстановок. Эти обстоятельства требуют для корректного решения обратных задач существенных объемов априорной информации, что само по себе порождает проблему ее получения и формализации (например, весовые функции, характеризующие удаленность от известных объектов и ...).
- Одним из возможным путей преодоления этой проблемы является фрагментация больших моделей на ряд локальных моделей, выделяемых по аномальным особенностям физических полей. Уменьшенная размерность локальной модели позволяет получать адекватные решения при относительно небольшом объеме доступной априорной информации о диапазонах плотности или магнитных характеристик.
- Развиваемый подход к последовательным инверсиям (каскадная инверсия) локальных моделей с их интеграцией в общую модель реализует программно-алгоритмическим способом традиционный для интерпретации данных грави- и магниторазведки метод геологических редукций.

Информация для построения интерпретационных моделей

1. Поле и характеристика системы наблюдений.
2. Параметры сеточной модели: размеры модели в целом; размеры ячеек и окаймляющей зоны.
3. Параметры модели инверсии локальных аномалий:
 - a) размеры соответствующего фрагмента сеточной модели;
 - b) диапазоны регуляризационных параметров α и λ для инверсии с использованием регрессии по методу эластичной сети.
4. Априорная информация о физических характеристиках среды в виде диапазонов значений плотности (гравиразведка) и магнитных параметров: магнитная восприимчивость; коэффициент Кенигсбергера; склонение и наклонение вектора остаточной намагниченности.



Общая схема каскадной инверсии

1. Выделение локальной аномальной области и ей соответствующего фрагмента сеточной модели.
2. Инверсия поля локальной аномальной области с выделением локального объекта (связного множества ячеек сеточной модели) на основе алгоритма регрессии по методу эластичной сети.
3. Исключение аномального эффекта выделенного объекта и блокирование соответствующих ему ячеек.
4. Выделение следующих объектов (пп. 1- 3).
5. Ревизия полученных объектов с учетом аномальных эффектов всех выделенных объектов.
6. Повторение процесса (пп. 1- 5) до стабилизации невязки модельного и исходного полей.

Инверсия локального аномального поля с использованием робастной регрессии по методу эластичной сети (ELNET)

Основана на поиске решения путем минимизации функционала

$$\min_{\beta_0, \boldsymbol{\beta}} R_\lambda(\beta_0, \boldsymbol{\beta}) = \min_{\beta_0, \boldsymbol{\beta}} \left[\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (d_i - \beta_0 - F_i^T \boldsymbol{\beta})^2 + \lambda P_0(\boldsymbol{\beta}) \right],$$

где в регуляризирующей части

$$P_0(\boldsymbol{\beta}) = (1 - \alpha) \frac{1}{2} \|\boldsymbol{\beta}\|_{l_2}^2 + \alpha \|\boldsymbol{\beta}\|_{l_1} = \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{2} (1 - \alpha) \beta_j^2 + \alpha |\beta_j| \right]$$

β_0 – фоновая (постоянная) составляющая поля;

$\boldsymbol{\beta}$ – искомые коэффициенты (плотность, магнитная восприимчивость);

F - \mathbf{F}_{QDI} - матрица базисных функций;

λ - параметр регуляризации; α – определяет вклад метрик L_2 и L_1 в решение ($0 < \alpha \leq 1$).

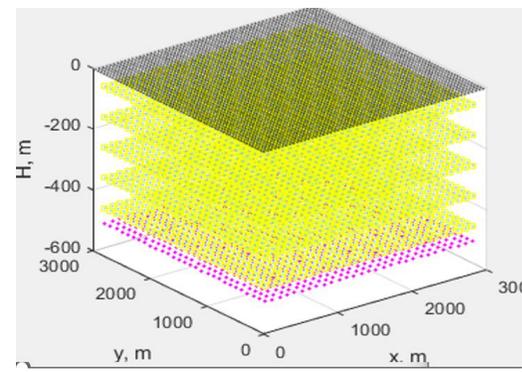
При $\alpha = 0$ -> L_2 -решение (регуляризация по А. Н. Тихонову, гребневая регрессия).

При $\alpha = 1$ -> L_1 -решение – LASSO [R. Tibshirani, 1996].

При $0 < \alpha < 1$ - компромиссное решение по методу эластичной сети [H. Zou, T. Hastie, 2005].

Инверсия ELNET на примере модели куба 200×200×200 м с верхней кромкой на глубине 100 м с магнитной восприимчивостью 0.01 СИ.

Ячейка сеточной модели 100×100 ×100 м



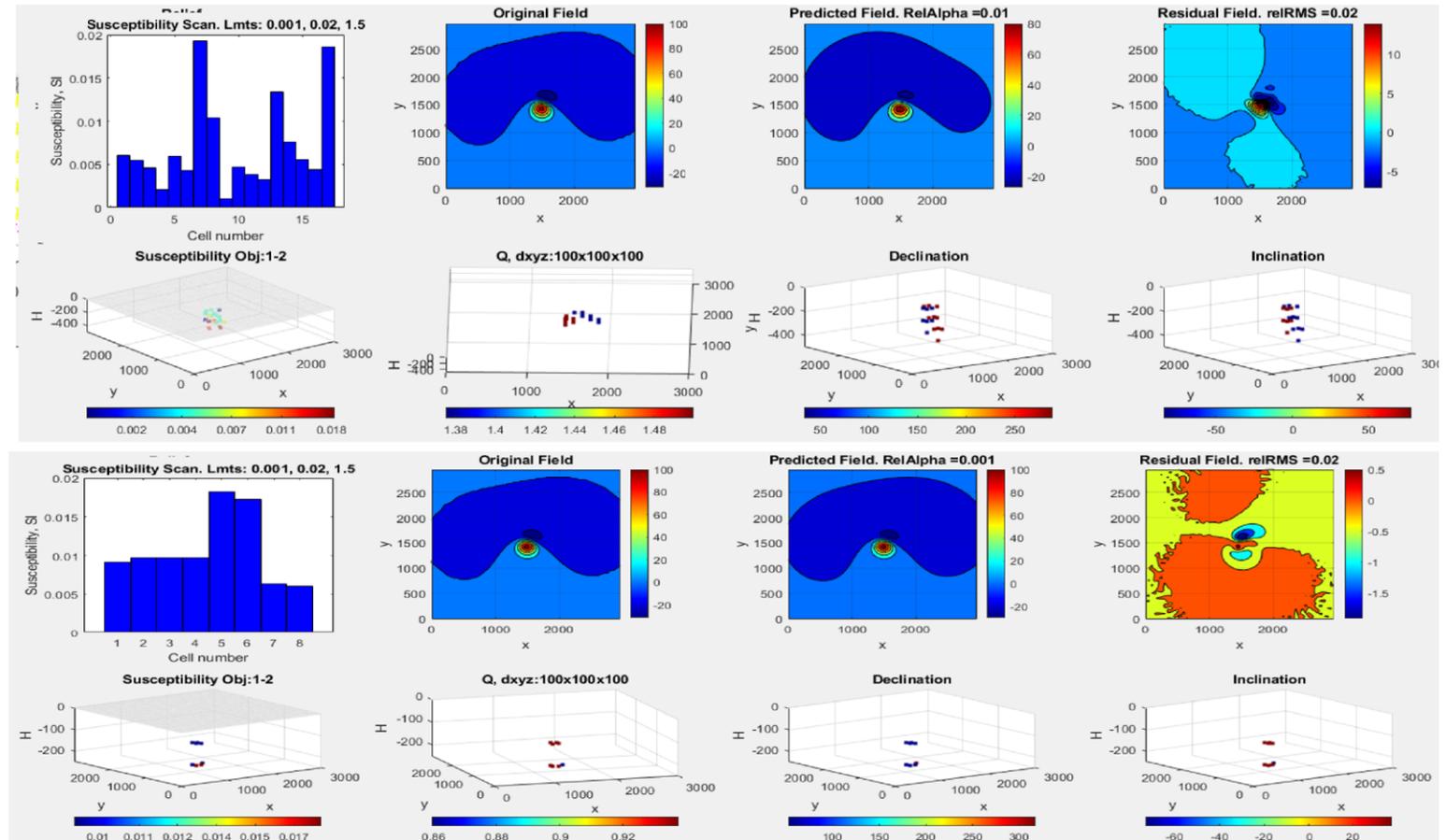
$\alpha = 0.01$

Obj	Q	Dr	Ir	nCells
1	1.5	33.8	77.8	7
2	1.4	288.8	-84.1	10

$\alpha = 0.001$

Obj	Q	Dr	Ir	nCells
1	0.9	52.5	37.5	7
2	0.9	316.9	-73.1	1

Obj	Q	Dr	Ir	nCells
1	1.0	45.0	30.0	8



Каскадная инверсия на основе сеточной модели

На одной итерации

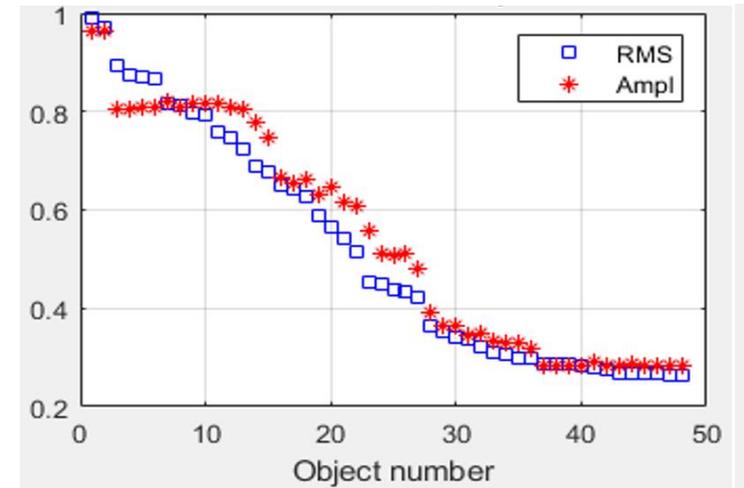
Выделение объектов

1. Последовательное выделение объектов локальной инверсии (локальные аномалии и соответствующие им локальные объемы общей сеточной модели).
2. Выделение (или невыделение) объекта по компактному множеству ячеек локального объема сеточной модели на основе использования регрессии по методу эластичной сети.
3. Вычитание эффекта локального объекта из поля общей модели в том случае, когда невязка остаточного поля убывает.
4. Повторение процедуры, начиная с п. 1.

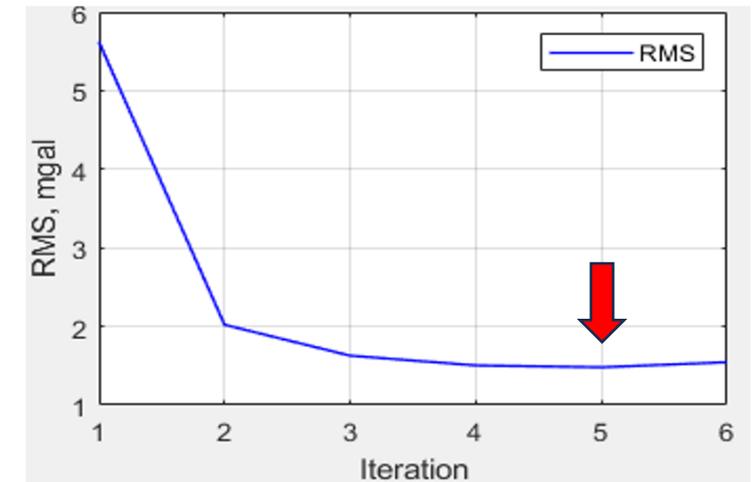
По нескольким итерациям

Ревизия выделенных объектов

Инверсия аномальных полей выделенных объектов в последовательности, определяемой контрастностью локальных аномалий этих объектов. Параметры инверсии используют результаты предшествующего выделения локального объекта. Геометрия уточненной локальной модели корректируется в том числе за счет оболочки дополнительных ячеек. В этом процессе некоторые объекты могут «исчезать», могут также добавляться новые.



Изменение невязки и амплитуды остаточного поля при последовательном выделении объектов на одной итерации



Изменение невязки в процессе итераций

Векторное сканирование и инверсия с определением магнитной восприимчивости

Векторное сканирование позволяет уменьшить размерность обратной задачи за счет фиксации вектора остаточной намагниченности. В этом случае при каждом векторе J_r , выбираемом из заданного регулярного множества, проводится инверсия с определением магнитной восприимчивости. В результате использования процедуры ELNET выделяется/не выделяется новый локальный объект.

Ограничения при инверсии:

1. Положительная эффективная магнитная восприимчивость ячеек выделяемого объекта;
2. Однородность параметров векторов остаточной намагниченности (Q, D_r, I_r) для выделяемого локального объекта.

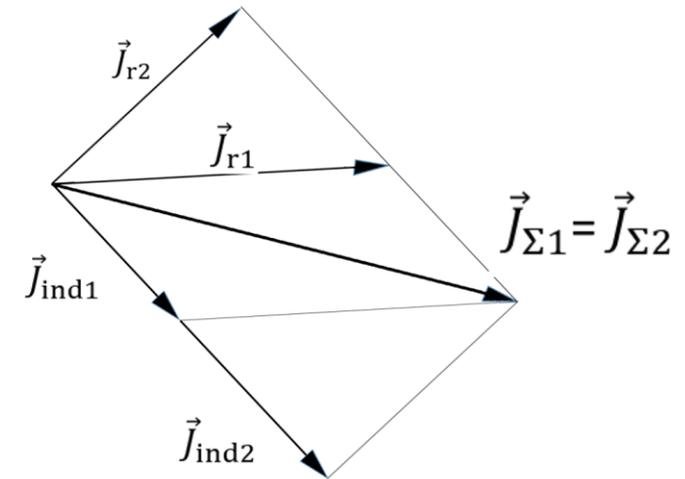
Определение параметров остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости локального объекта

Использование векторного сканирования для определения параметров остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости локального объекта, представленного множеством ячеек сеточной модели

$$\Delta T = \mathbf{F}_{QDI} \mathbf{x},$$

где $\mathbf{F}_{QDI} = \frac{T_0 \mathbf{W}_{rr} (\vec{b} Q + \vec{a})}{\mu_0}$, $\mathbf{W}_{rr} = [\mathbf{V}_{xx} \ \mathbf{V}_{xy} \ \mathbf{V}_{xz} \ \mathbf{V}_{yz} \ \mathbf{V}_{zz}]$;

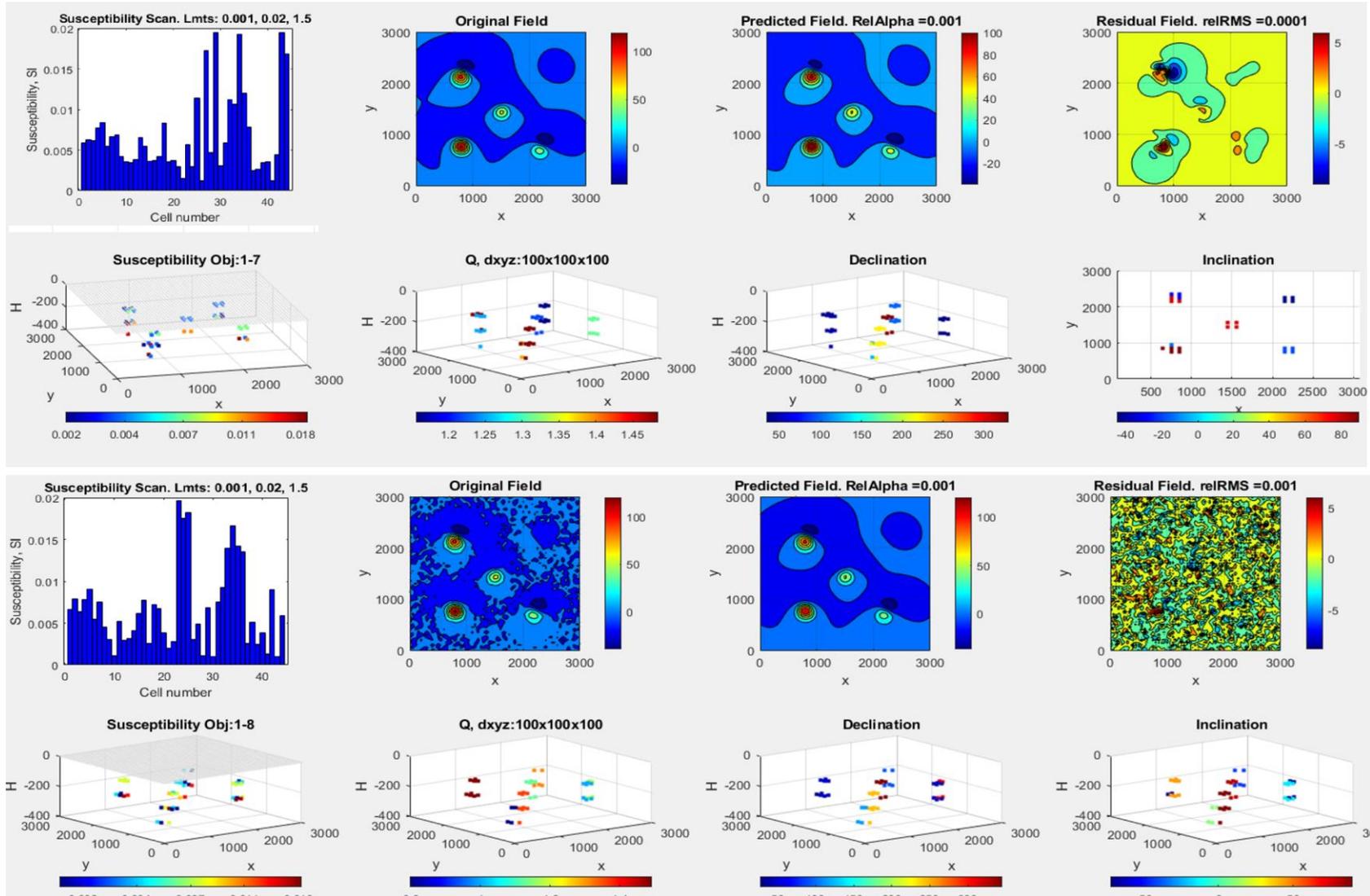
$$\vec{b} = \begin{bmatrix} a_{0x} a_{rx} - a_{0y} a_{ry} \\ a_{0x} a_{ry} + a_{0y} a_{rx} \\ a_{0x} a_{rz} + a_{0z} a_{rx} \\ a_{0y} a_{rz} + a_{0z} a_{ry} \\ a_{0z} a_{rz} - a_{0y} a_{ry} \end{bmatrix}; \quad \vec{a} = \begin{bmatrix} a_{0x}^2 - a_{0y}^2 \\ 2a_{0x} a_{0y} \\ 2a_{0x} a_{0z} \\ 2a_{0y} a_{0z} \\ a_{0z}^2 - a_{0y}^2 \end{bmatrix}$$



Размерность \mathbf{F}_{QDI} - $n \times m$, размерность блоков \mathbf{W}_{rr} также $n \times m$. \mathbf{a}_0 и \mathbf{a}_r - направляющий вектор нормального поля и тестируемого вектора остаточной намагниченности.

Формула позволяет не переычислять матрицы базисных функций \mathbf{V}_{**} при изменении параметров вектора остаточной намагниченности.

Помехоустойчивость QDIK-инверсии

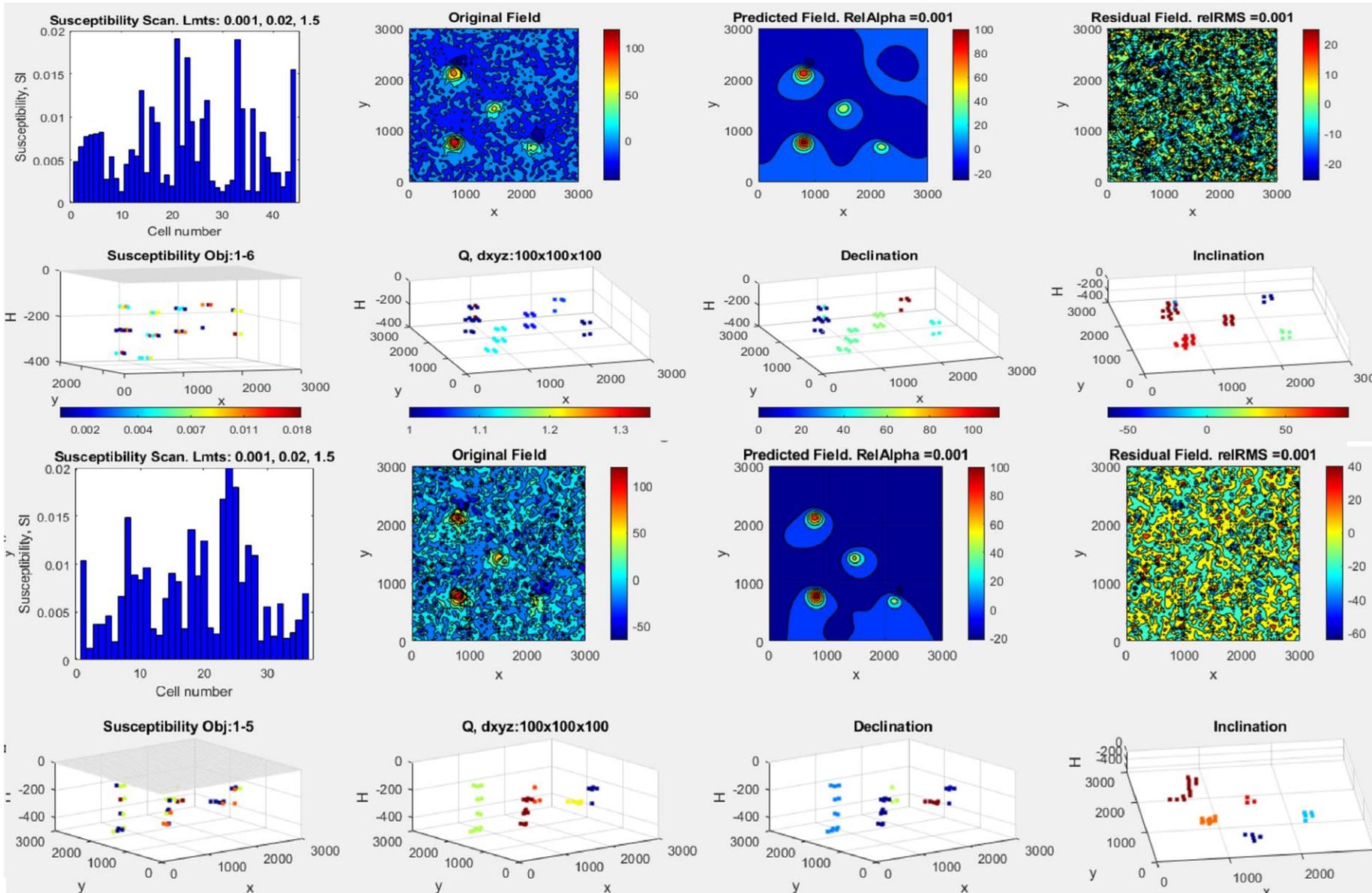


StdNoise = 0 nT

StdNoise = 2 nT

~ 1% амплитуды
поля модели

Помехоустойчивость QDIK-инверсии



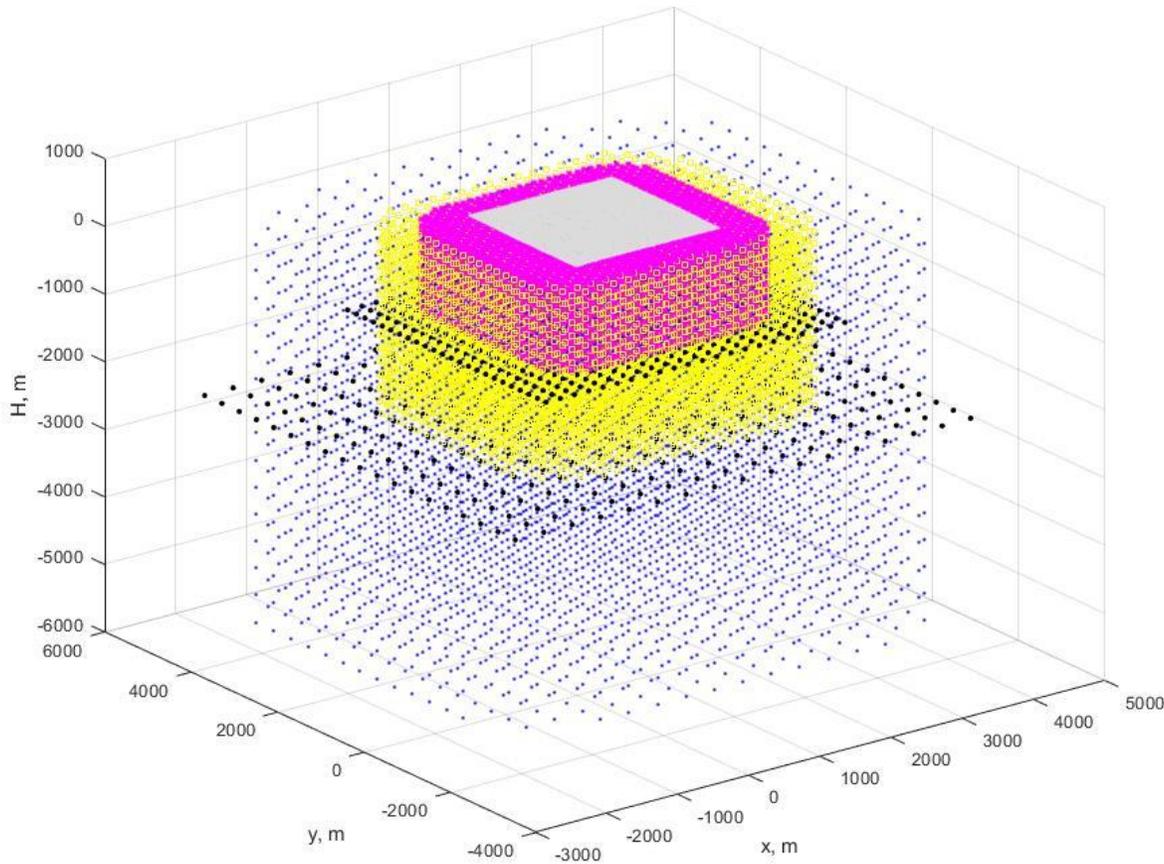
StdNoise = 8 nT

~ 5% амплитуды
поля модели

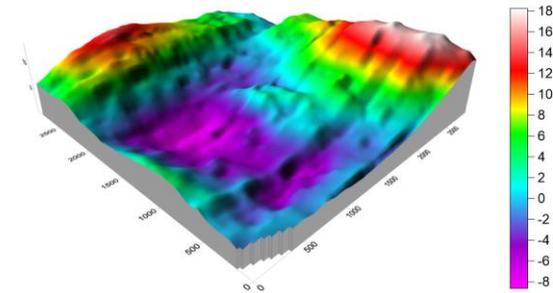
StdNoise = 17 nT

~ 10% амплитуды
поля модели

Последовательная детализация моделей инверсии за счет исключения эффектов источников внешних по отношению к следующей сеточной модели (сбалансированная фильтрация)

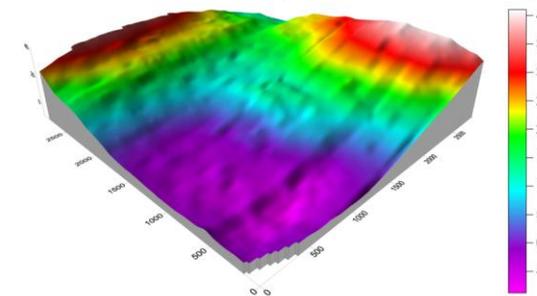


Поле после исключения источников ниже горизонта -650 м



Ячейка 100×100×100 м

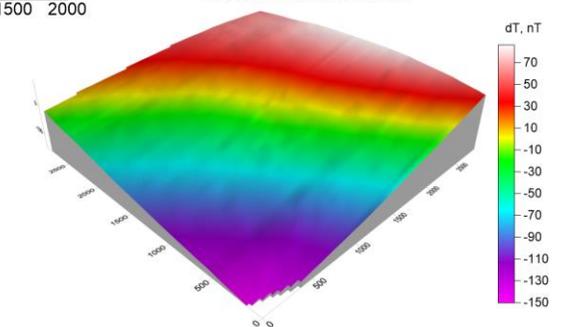
Поле после исключения источников ниже горизонта -2250 м



200×200×200 м

0 500 1000 1500 2000

Исходное магнитное поле

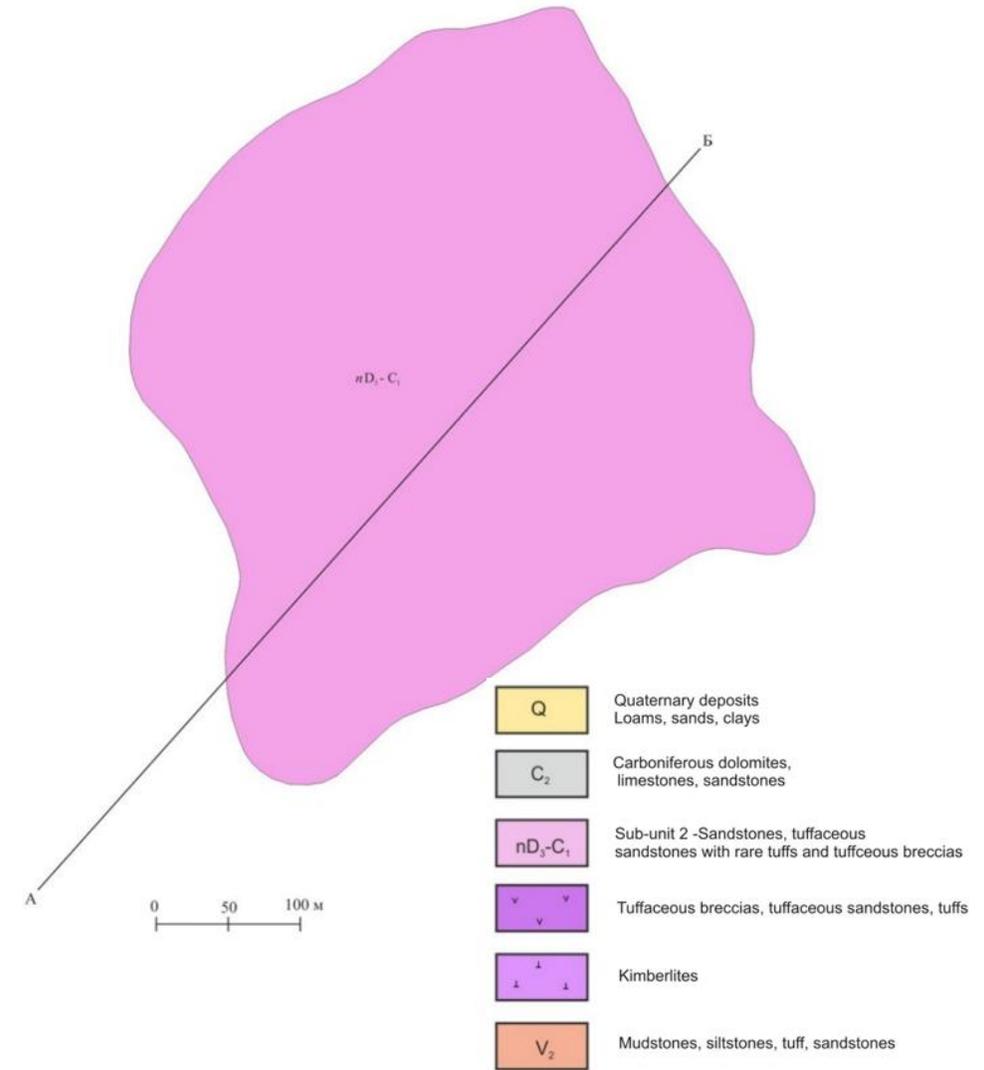
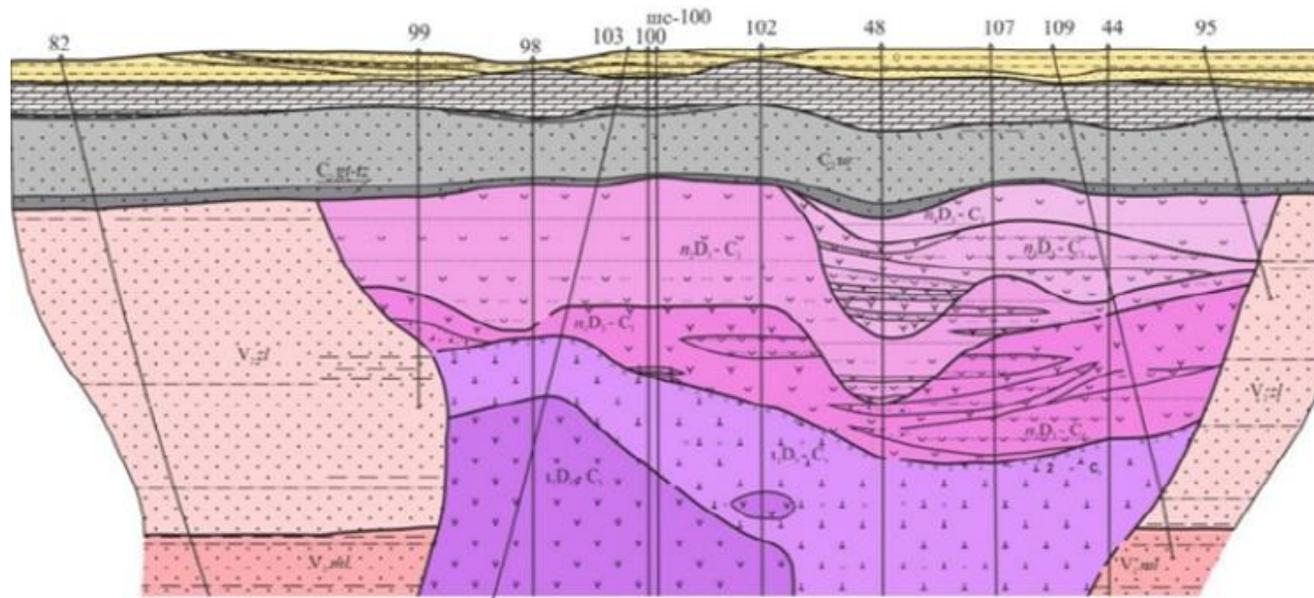


Ячейка 400×400×400 м

Geology of Grib pipe

Grib kimberlite pipe was discovered in 1996 and has been since a subject to multiple geophysical and petrophysical surveys, including several airborne magnetic data sets. Recent data are significantly affected by the industrial noise and heavy presence of drill hole casings and mining machinery.

Therefore an early fixed wing airborne data set dated 1985 was selected for current study

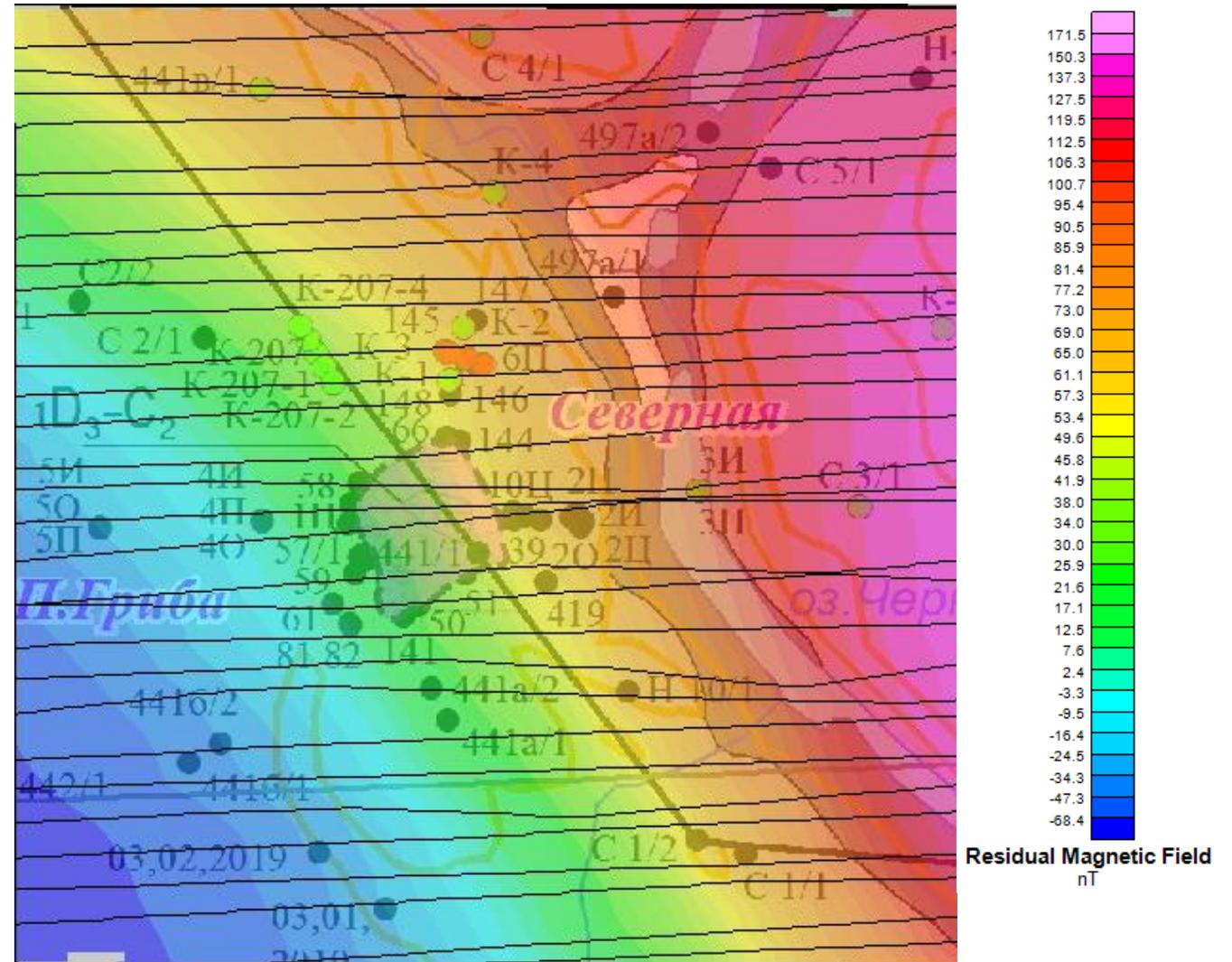


Airborne magnetic survey of 1985

Airborne magnetic survey of 1985 was conducted using fixed wing aircraft AN-2 with terrain clearance of 120 m and line spacing of 100m

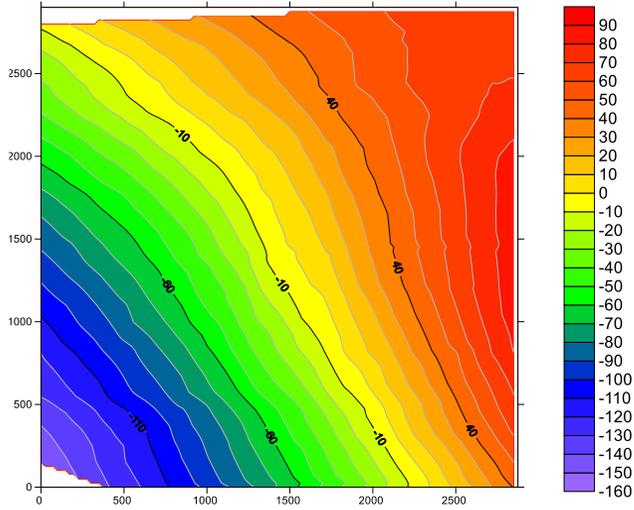
This slide shown a selected area surrounding Grib kimberlite pipe covered by airborne magnetic survey

The airborne data are not subject to industrial interference from man made objects, as Grib pipe was discovered 11 years after current survey was initially flown

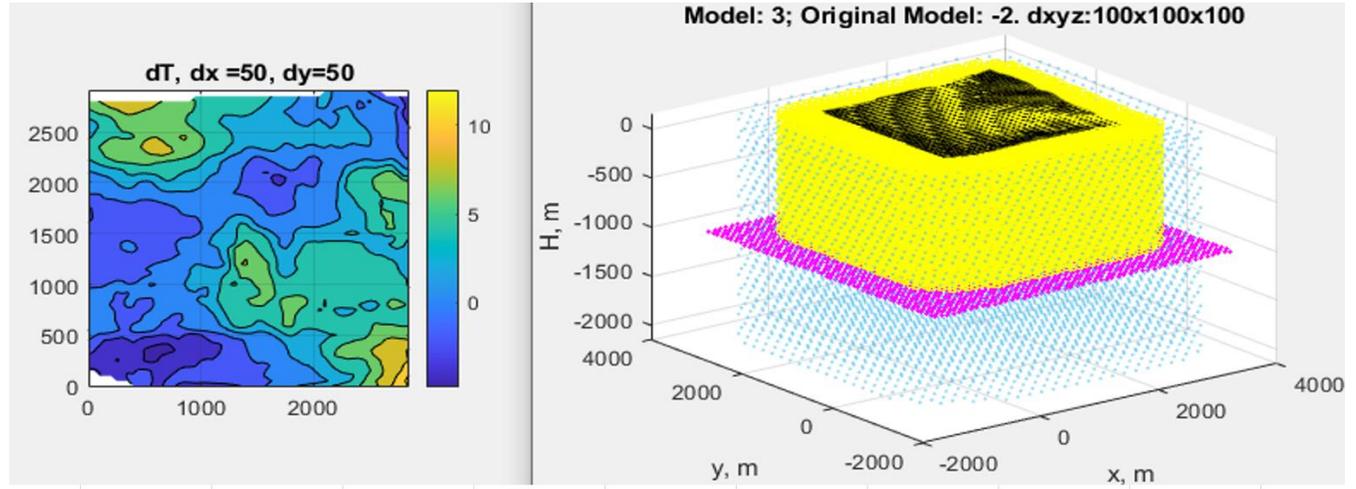


Выделение локального объекта (трубка Гриба). Начальная сеточная модель с ячейкой 400×400×400 м, финальная - 25×25×25 м

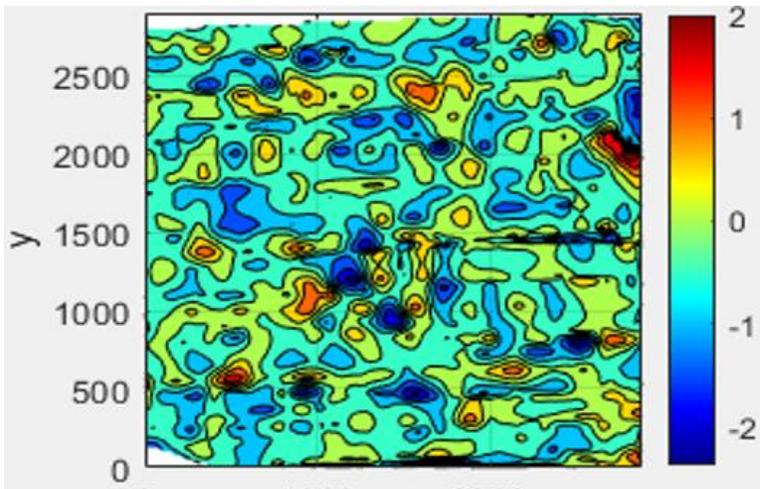
Исходное поле dT



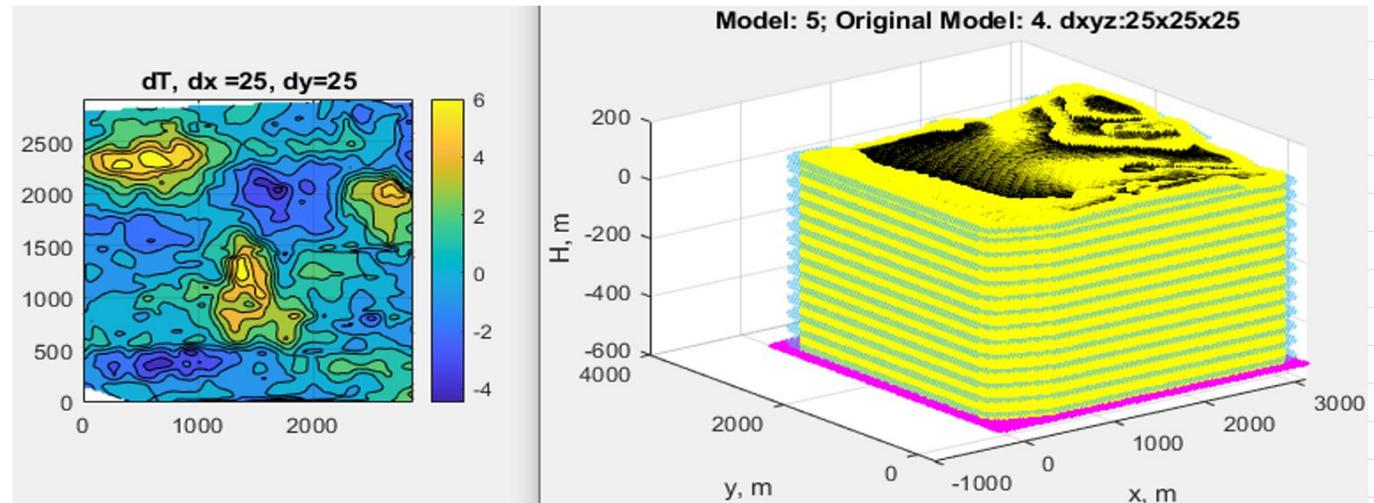
Остаточное поле для модели 200×200×200 м сетка следующей модели



Residual Field, RMS = 0.49 nT

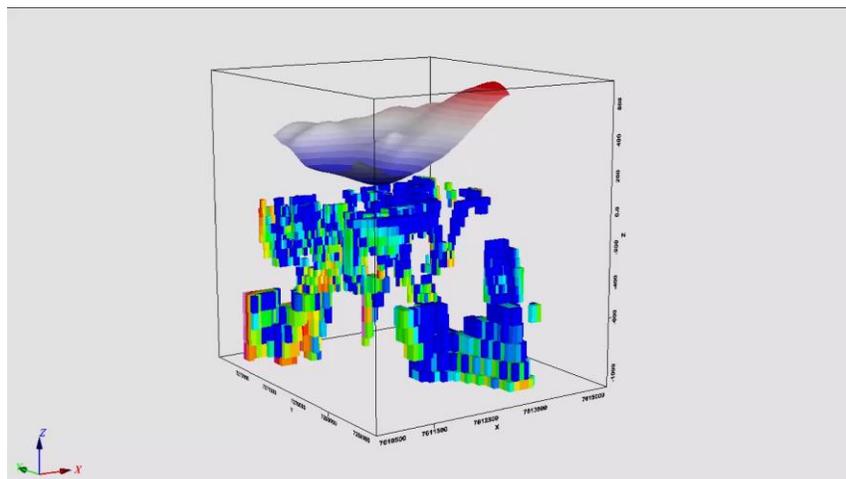
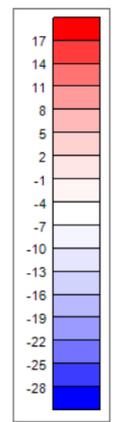


Остаточное поле для модели 50×50×50 м сетка следующей модели

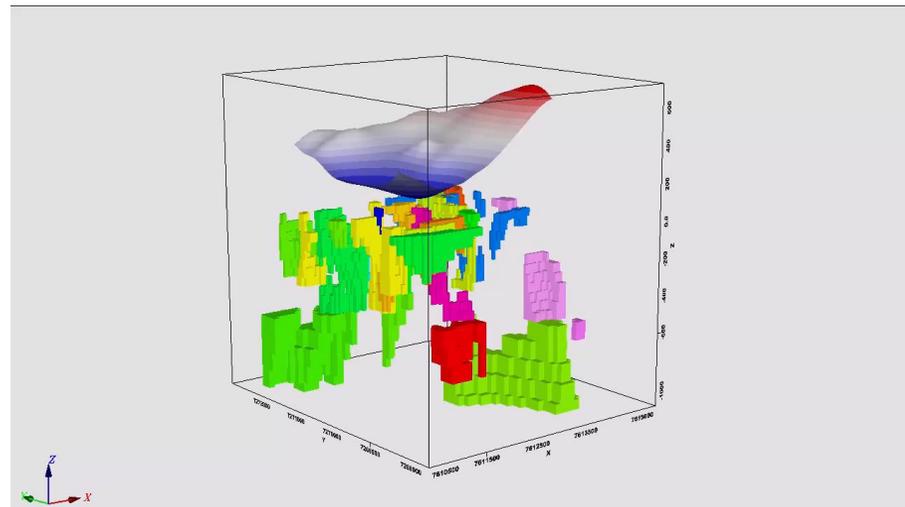
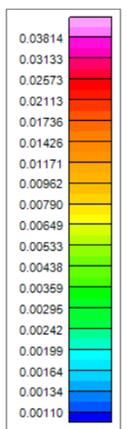


Результаты каскадной инверсии поля ΔT (трубка Гриба)

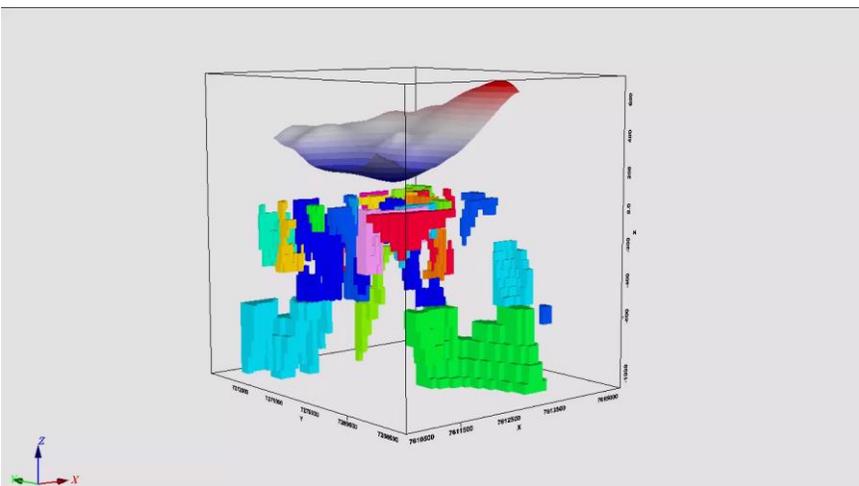
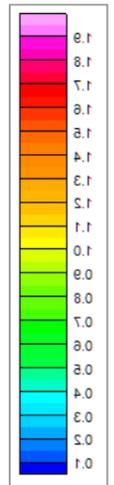
ΔT , нТл



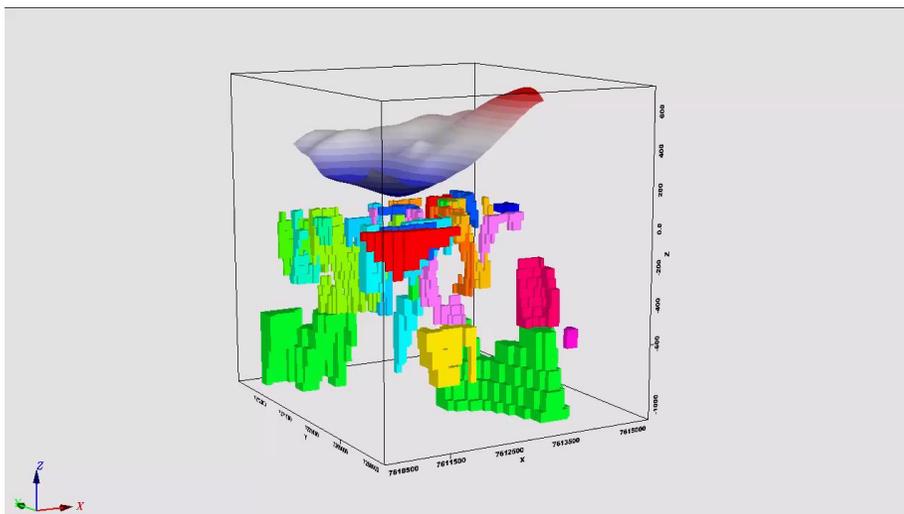
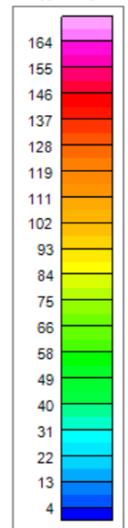
κ , ед. СИ



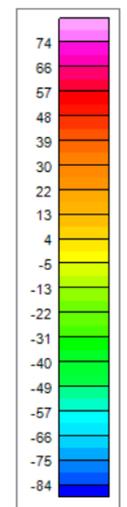
Q



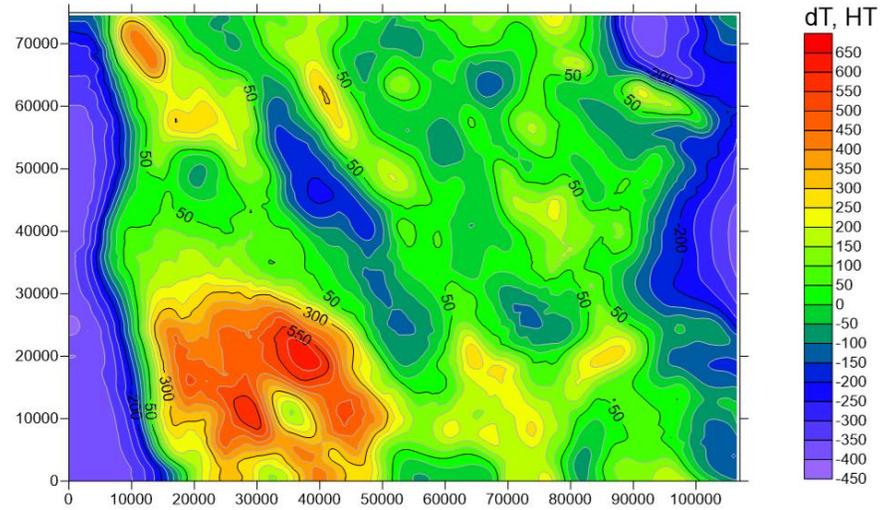
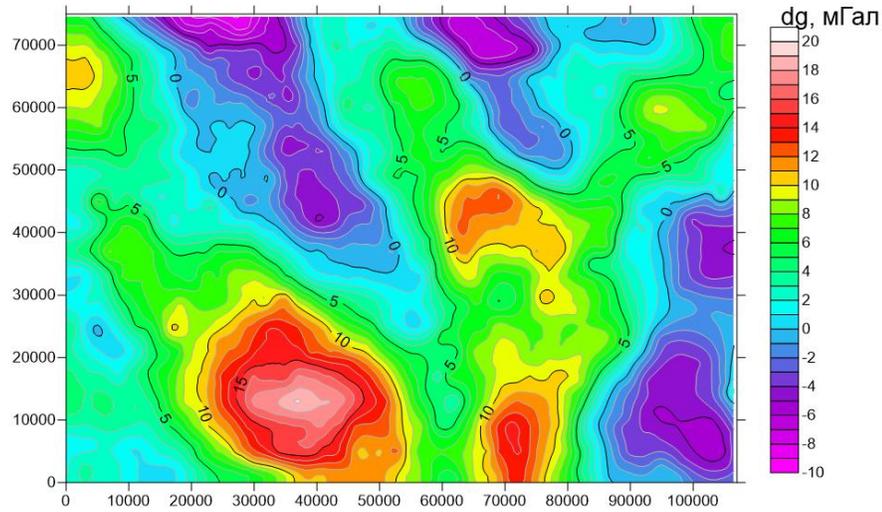
D_r , град



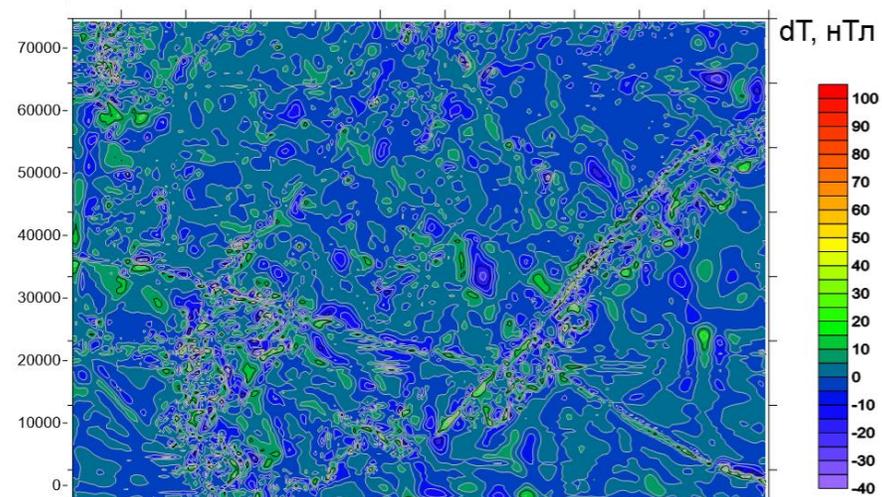
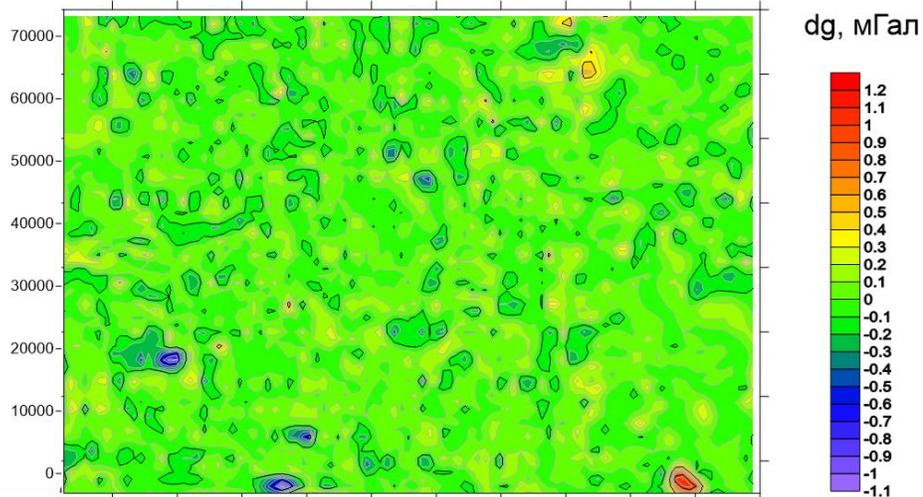
I_r , град



Гравитационное и магнитное поля исходные и остаточные (северо-восточная часть Сибирской платформы)



Размер ячеек
сеточных моделей:
4000×4000×4000;
2000×2000×2000;
1000×1000×1000;
500×500×500; м.



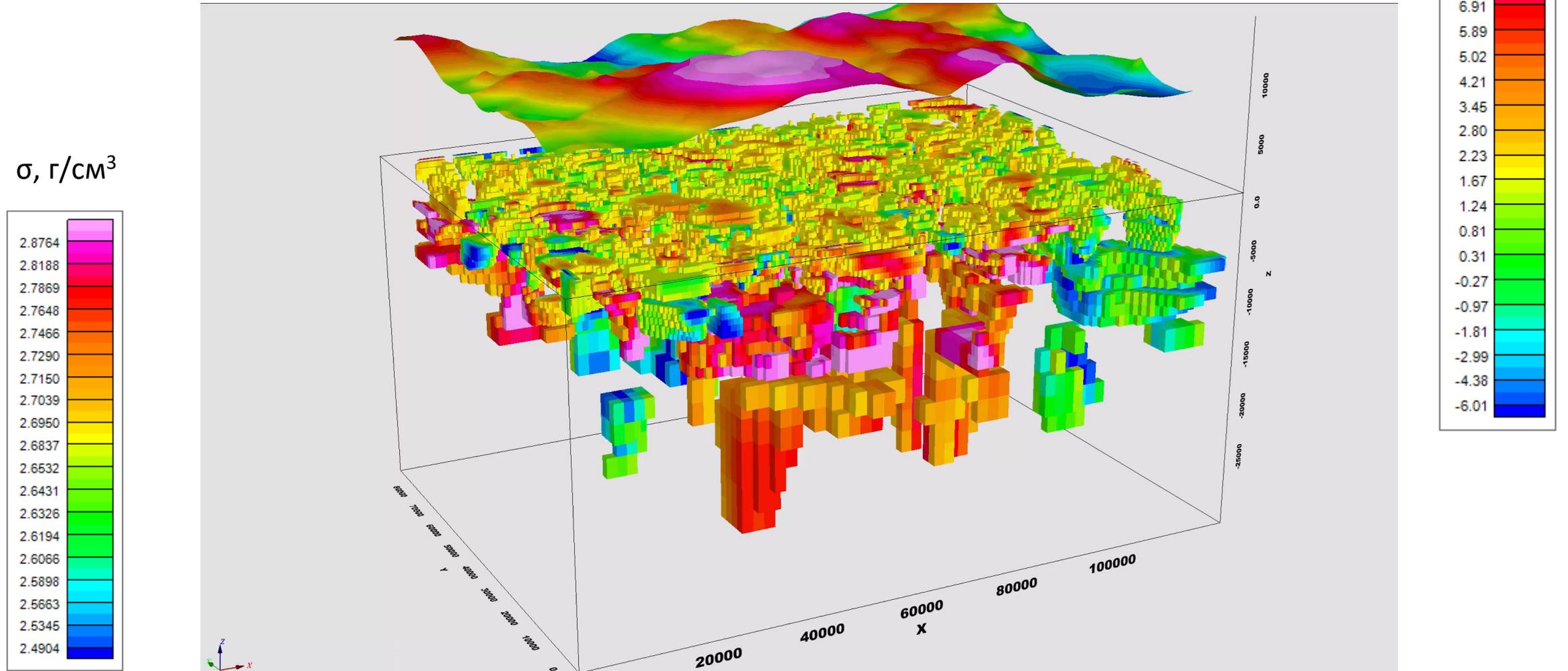
$RMS(dg) = 0.12$ мГал,

$RMS(dT) = 5$ нТл,

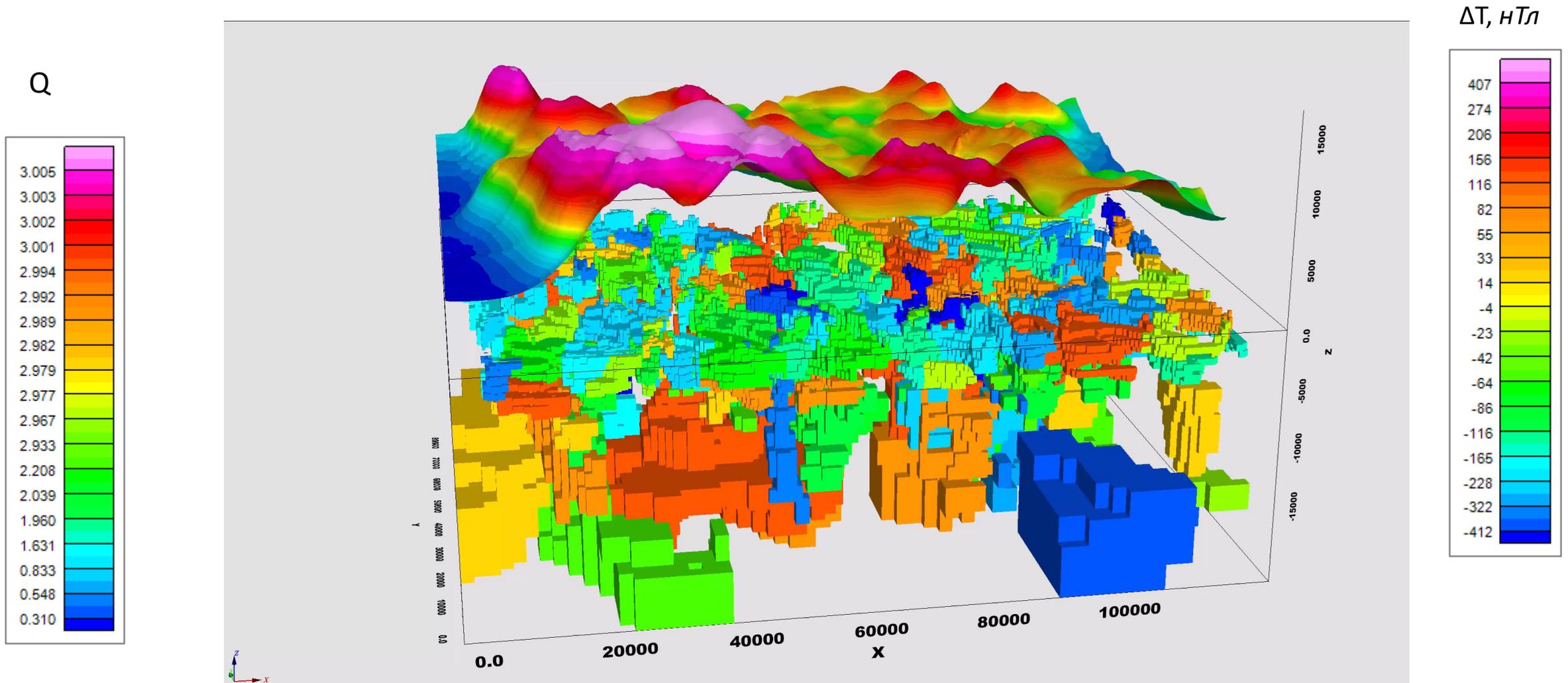
0 20000 40000 60000 80000
m₀

Плотностная модель по результатам каскадной инверсии (северо-восточная часть Сибирской платформы)

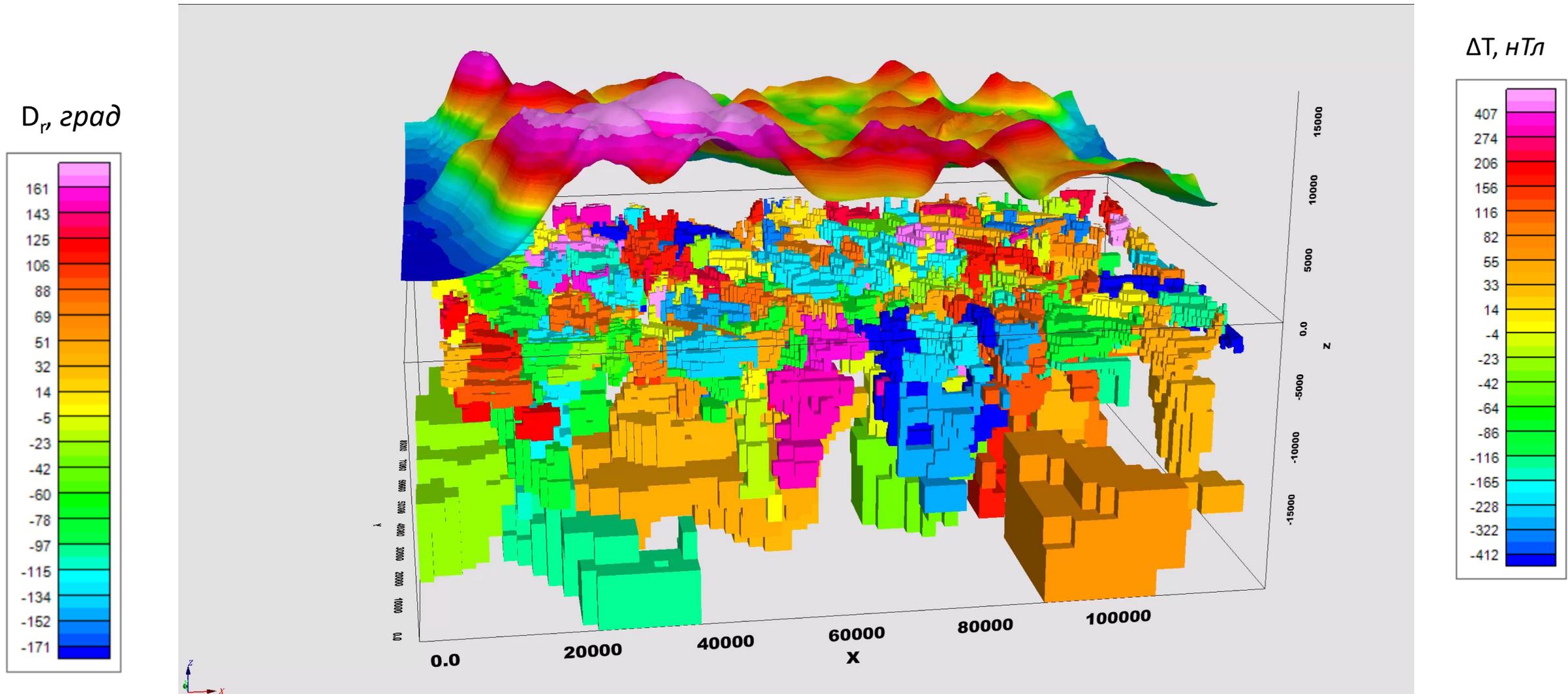
Δg , мГал



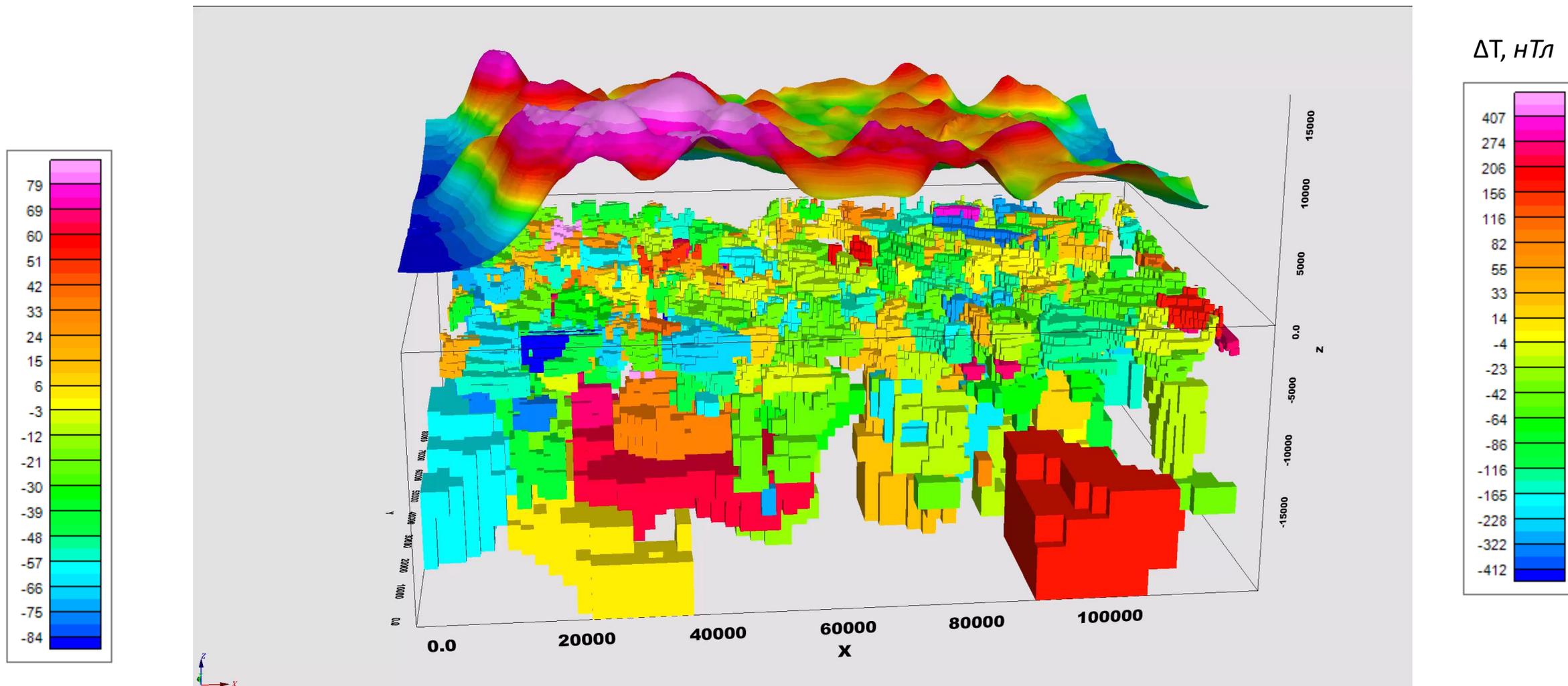
Эффективные значения коэффициента Q по результатам каскадной инверсии (северо-восточная часть Сибирской платформы)



Эффективные значения склонения вектора остаточной намагниченности (северо-восточная часть Сибирской платформы)



Эффективные значения наклонения вектора остаточной намагниченности (северо-восточная часть Сибирской платформы)



Интерпретационные модели и эффективные параметры

Полученные в результате инверсии модели в свою очередь подлежат анализу и геологической интерпретации, т. к. в них заложены определенные ограничения и допущения.

Проблема сопоставления эффективных физических параметров с данными полученными на образцах или *in situ* (каротаж) обусловлена:

1. Усреднением физических характеристик в объеме используемой ячейки.

Легко показать, что, например, для двухфазной среды, в которой :

p – доля объема первой фазы;

μ_1 и σ_1^2 - математическое ожидание и дисперсия физического свойства первой фазы;

$(1 - p)$ - доля объема второй фазы;

μ_2 и σ_2^2 - математическое ожидание и дисперсия физического свойства второй фазы;

Математическое ожидание и дисперсия среднего

$$\mu = p\mu_1 + (1 - p)\mu_2;$$

$$\sigma^2 = p\sigma_1^2 + (1 - p)\sigma_2^2 + p(1 - p)(\mu_1 - \mu_2)^2$$

зависят от параметров неоднородностей, попавших в этот объем.

2. Ошибками аппроксимации геометрии реальных физических неоднородностей ячейками сеточных моделей.
3. Другими факторами (анизотропия магнитной восприимчивости), а также особенностями реализации использованных алгоритмов.

При интерпретации полученных в результате инверсии эффективных значений магнитной восприимчивости и параметров остаточной намагниченности необходимо учитывать такого рода факторы.

Выводы и перспективы

- Развиваемый на основе каскадной инверсии подход позволяет получать реалистичные интерпретационные модели по данным грави- и магниторазведки различной степени детальности (аэро-, БПЛА, наземные съемки) .
- Возможность массовых определений параметров остаточной намагниченности позволяет надеяться на существенное повышение эффективности геологического истолкования данных магнитной съемки за счет получения составляющих интерпретационных моделей, отражающих генезис и метаморфозы геологических объектов.
- Немаловажным аспектом является возможность использования полученных в результате каскадной инверсии моделей в качестве референтных для решения интерпретационных задач значительной размерности (данные съемок на значительных территориях с высокой плотностью сети наблюдений).
- Возможность исключения магнитных эффектов, обусловленных эффективной остаточной намагниченностью, позволяет использовать редуцированное поле для более корректного определения эффективной магнитной восприимчивости.

Список литературы

1. Блох Ю.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Оценка остаточной намагниченности подводных вулканов Курильской островной дуги с применением программы ИГЛА // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. № 26. С. 5-10.
2. Давыденко А.Ю. Инверсия магнитного поля на основе эластичной сети и векторного сканирования для оценки магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности трехмерных объектов // В сб.: Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова. Воронеж, 2020. С. 105-110.
3. Давыденко А. Ю. Каскадная инверсия данных гравиразведки и магниторазведки // В сб.: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова, Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. 2023. с. 126 – 131.
4. Давыденко А. Ю. Построение интерпретационных моделей с использованием каскадной инверсии гравитационных и магнитных полей. Материалы 50-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова, Москва: ИФЗ РАН. 2024. с. 126 – 131.
5. Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., и др. О построении плотностных моделей земной коры на основе параллельных алгоритмов решения обратных задач гравиметрии // В сб.: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова, Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. 2023. с. 225 – 228.
6. Clark, D. A, Methods for determining remanent and total magnetizations of magnetic sources – a review // Exploration Geophysics, 45, 2014, 271-304, doi: 0.1071/EG14013.
7. Cuma, M., Wilson, G., and Zhdanov, M.S. Large-scale 3D inversion of potential field data // Geophysical Prospecting, 2012, vol. 60, Issue 6, November, pp 1186-1199.
8. Ellis, R. G. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources / Ellis, R.G., Wet, B., and Macleod, I.N. // ASEG Extended Abstracts, 2012:1, 1-4, DOI: 10.1071/ASEG2012ab117
9. Kaminski V., Davydenko A., Frolov A., Shalovenkova. I. Magnetization Vector 3D Inversions of Airborne Magnetic Data Flown Over Grib Kimberlite Pipe // European Association of Geoscientists & Engineers, Source: NSG2022 4th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, Sep 2022, Volume 2022, p.1 – 5, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202220055>.
10. Lelièvre P. G., Oldenburg D. W., and Williams N. C. Integrating geological and geophysical data through advanced constrained inversions // Exploration Geophysics, 2009, 40(4), pp 334-341.
11. Liu, S., Fedi, M., Hu, X., Baniamerian, J., Wei, B., Zhang, D., & Zhu, R. Extracting induced and remanent magnetizations from magnetic data modeling // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123, 9290–9309. doi: 10.1029/2017JB015364.
12. Mitsuru Utsugi. 3-D inversion of magnetic data based on the L1–L2 norm regularization // Utsugi Earth, Planets and Space, 2019, 71:73 // <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1052-4>.
13. Zou H., Hastie T. Regularization and Variable Selection via the Elastic Net // H. Zou, T. Hastie Journal of the Royal Statistical Society B, 2005, 67(2), 301-320.
14. Davydenko S.Yu., Davydenko Yu.A., Davydenko A.Yu. and etc. Geophysical Methods in The Study of The Ancient Metallurgical Complex in The Western Baikal Region (Section Barun-Khal II) // European Association of Geoscientists & Engineers // Source: Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume 2021, p.1 – 10. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152045>.

Благодарю за внимание!