

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ / проф. Егоров А.С./

"__" _____ 2021 г.

**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
РОССИИ**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра геофизических и геохимических методов поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых**

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

по дисциплине **ТЕОРИЯ ПОЛЯ**
(наименование учебной дисциплины согласно учебному плану)

**Тема: АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ДЛЯ
МАТЕРИАЛОВ ПЛОЩАДНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**
Вариант 7

Выдано: студенту гр. РФ-18
(шифр группы)

(подпись)

/Лебедкова М.А./
(Ф.И.О.)

Специальность: 21.05.03. «Технология геологической разведки»

Специализация: Геофизические методы поиска и разведки месторождений полезных
ископаемых

Руководитель: доцент каф. ГФХРМ
(должность)

(подпись)

/Сенчина Н.П./
(Ф.И.О.)

Санкт-Петербург
2021

Аннотация

Целью данной работы является Автоматизация расчета вертикальной производной для материалов площадных наблюдений физических полей.

В качестве исходных данных использовалось модельное поле шара, рассчитанное в MS Excel и реальные данные магнитометрической съемки. Работа была выполнена с использованием программы Python 3.8.

Пояснительная записка содержит: 20 страниц, 4 рисунка и библиографический список из 5 наименований.

Abstract

The purpose of this work is to automate the calculation of the vertical derivative for the materials of area observations of physical fields.

A model ball field calculated in MS Excel and real magnetometer survey data were used as input data. The work was performed using the Python 3.8 program.

The explanatory note contains: 20 pages, 4 figures, and a bibliography list of 5 titles.

Содержание

Аннотация	2
Введение	4
Теоретические сведения	5
Алгоритм расчета вертикальной производной	9
Графические результаты работы	16
Заключение	19
Список литературы	20

Введение

Для успешной интерпретации геофизической информации очень часто применяются различные трансформанты. Одной из самых используемых является вертикальная производная. Она позволяет отчетливо выделить крупные локальные аномалии, что часто является главной целью геофизических исследований.

Существует не один способ вычисления вертикальной производной. В данной работе использовался метод вычитания поля, пересчитанного в верх на высоту $h = 1$, из исходного. Данный метод позволяет расширить функциональность результирующей функции расчета, так как с её помощью можно получить ещё и данные поля, пересчитанного вверх на любую высоту. Это не было бы возможно при прямом расчете вертикальной производной.

Сам же пересчет в верхнее полупространство выполняется в частотной области с использованием прямого и обратного преобразования Фурье. Данный способ был выбран, так как он экономичен по времени.

Для расчетов использовался один из наиболее популярных на данный момент языков программирования Python 3.8, а также программа Surfer 19 для юолее информативного построения карт.

Теоретические сведения

При геофизических, гравимагнитных исследованиях, например в океане, измерительный комплекс аппаратуры помещается либо на корабле, либо в приповерхностном слое воды. Аномалиеобразующие тела залегают в толще земной коры на различных уровнях подо дном океана. Поэтому все измерения, производимые фактически с поверхности воды, как бы удалены от объектов в верхнее полупространство на расстояние, равное глубине океана в точке наблюдения. Аналогичная ситуация возникает при наблюдениях на суше, когда поверхность кристаллического фундамента, где сосредоточены основные аномалиеобразующие массы, отделена от поверхности наблюдения осадочной толщей. Такое удаление от источников аномалий, конечно, ослабляет наблюдаемые на поверхности потенциальные поля и ухудшает их разрешающую способность.

Попытки улучшить информацию путем наблюдений с приборов, буксируемых вблизи поверхности дна, хотя и дают положительные результаты, однако ввиду сложности и высокой стоимостью технического исполнения не выходят за рамки экспериментов. К настоящему времени разработан целый арсенал методов, позволяющих решить этот вопрос аналитически, используя лишь наблюденные значения D_z (DT) или D_g . Наиболее употребительными методами преобразования потенциальных полей являются осреднение, аналитическое продолжение (трансформация) поля в верхнее или нижнее полупространство, вычисление высших производных потенциала.

Поле аномалий D_g и DT , взятое, например, вдоль некоторого профиля, представляет чаще всего довольно сложную кривую. Она отражает суперпозицию взаимного влияния различных тел, расположенных на разных уровнях в земной коре.

Удаляясь или приближаясь к аномальным массам, мы будем тем самым ослаблять или усиливать те или иные аномалии, потому как в общем виде величина потенциала обратно пропорциональна расстоянию до возмущающего объекта:

$$V = G \frac{m}{r}$$

Гравитационный и магнитный потенциалы являются гармоническими функциями, т.е. слабо меняющимися при малых приращениях аргумента и дважды дифференцируемые. Однако, строго говоря, магнитный потенциал не вполне отвечает этому требованию, так как в знаменателе имеет квадрат расстояния (r^2), а не первую степень (r), как у гравитационного потенциала.

Согласно теореме Гаусса о среднем значении гармонической функции, она обладает важным свойством: будучи заданной на плоскости и на сфере, гармоническая функция может быть определена в любой точке пространства. Иными словами, значение гармонической функции, например, в центре круга равно интегральному среднему ее значения на окружности (плоская задача).

При этом оказывается, что при пересчете поля в верхнее и нижнее полупространства наиболее сильно изменяется поле от небольших по размерам объектов, расположенных близко к поверхности. Поле от глубоко расположенных крупных геологических объектов мало подвержено изменению при трансформациях. Пересчитывая поле Dg или DT вверх, мы в значительной степени исключаем влияние локальных структур и подчеркиваем поле, вызванное действием крупных региональных объектов.

С другой стороны, пересчитывая наблюдаемое поле в нижнее полупространство, например на уровень кристаллического фундамента, мы в значительной мере усиливаем интенсивность локальных аномалий, вызванных близко расположенными к поверхности небольшими объектами.

Таким образом, операция трансформации аналогична фильтрации: при пересчете вверх подавляются высокочастотные составляющие кривых Dg или DT и выделяются низкочастотные, при пересчете вниз, наоборот, происходит усиление высокочастотного фона аномалий и относительное уменьшение низкочастотных составляющих. Вычисление высших производных Dg или DT также, как и пересчет в нижнее полупространство, усиливает высокочастотные составляющие поля.

Существует несколько способов пересчета поля в верхнее полупространство. Часто это делают с помощью пересчета поля в частотную область с использованием преобразования Фурье:

$$F|f| = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ixw} dx$$

После данного преобразование получается частотный спектр функции (распределение амплитуды сигнала по частотам w). В частотной области пересчет поля вверх осуществляется гораздо проще, чем в пространственной, а значит при автоматизации данный процесс будет занимать намного меньше времени.

Чтобы пересчитать поле на высоту h , необходимо умножить амплитуду сигнала на следующее выражение:

$$F(w) = e^{-|w|h}$$

Далее, получив частотный спектр для пересчитанного вверх поля на требуемую высоту, необходимо вернуться в пространственную область для извлечения из результата необходимой нам информации для интерпретации геофизических данных. Сделать это можно с помощью обратного преобразования Фурье:

$$F^{-1}|f| = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(w)e^{ixw} dw$$

Получить вертикальную производную можно получить путем вычитания поля, пересчитанного вверх на $h = 1$, из исходного поля.

Если при пересчете поля вверх усиливаются региональные аномалии, то при расчёте вертикальной производной наоборот, отчетливо выделяются крупные локальные аномалии, которые чаще всего и интересуют исследователей на практике.

Расчет вертикальной производной часто применяется на практике. Это подтверждается наличием немалого количества научных статей на эту тему. Например:

- «Для геологического картирования угольного месторождения Джхария были использованы спутниковые гравитационные данные высокого разрешения гравитационно-восстановительного и климатического эксперимента (GRACE), полученные с помощью гравитационной модели Земли-2008 (EGM2008). ... Карта гравитационных аномалий была улучшена с помощью методов первой и второй вертикальных производных.»¹
- «Аэромагнитные данные 2009 года, скорректированные по данным IGRF над бассейнами Нижнего Бенуэ и Верхней Анамбры в Нигерии, были подвергнуты анализу вертикальных и горизонтальных производных, аналитическому сигналу и анализу сетки CET.»²

¹ [Geological mapping of Jharia Coalfield, India using GRACE EGM2008 gravity data: a vertical derivative approach](#) J Vaish, SK Pal - Geocarto International, 2015 - Taylor & Francis

² [Investigating the structures within the lower Benue and upper Anambra Basins, Nigeria, using first vertical derivative, analytical signal and \(CET\) Center for ...](#) AA Adetona, M Abu - Earth Sci, 2013 - researchgate.net

- «В данном исследовании метод вертикальной производной первого порядка был сначала применен к синтетическим данным, и работоспособность метода была исследована путем создания сценариев с различной плотностью в пределах одного блока. Позже, для сравнения результатов сценариев, были выбраны Адала-Маниса/Турция и окрестности с вулканической историей из-за существования подземных структур, сформированных в результате вкраплений вулканических областей.»³

- «Настоящее исследование посвящено картированию угольного пожара на шахте East Basuria Colliery, угольное месторождение Jharia, Индия, с использованием магнитного метода. ... Для анализа магнитных данных и их интерпретации было использовано несколько методов обработки данных, таких как суточная коррекция, приведение к полюсам (RTP), первая и вторая вертикальные производные.»⁴

Таким образом, автоматизация процесса расчета вертикальной производной геофизического поля является весьма актуальной задачей. В данной работе использовался метод пересчета поля по профилям без радиального осреднения.

³ [Investigation of distribution of embedded shallow structures using the first order vertical derivative of gravity data T Gönenç](#) - Journal of Applied Geophysics, 2014 - Elsevier

⁴ [Coal fire mapping of East Basuria Colliery, Jharia coalfield using vertical derivative technique of magnetic data SK Pal](#), J Vaish, S Kumar, AK Bharti - Journal of Earth System Science, 2016 - Springer

Алгоритм расчета вертикальной производной

Перед началом работы необходимо подключить все библиотеки, функции которых будут использоваться в работе.

```
In [1]: import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from numpy.fft import fft, ifft, fftfreq, rfft, rfftfreq, irfft
import pylab
import cmath
import math
import plotly.graph_objects as go
from plotly.subplots import make_subplots
```

Далее выгружаем данные модельного поля шара.

```
field_ball = pd.read_excel('D:\\Горный\\Теория поля\\курсовая\\Поле шара.xlsx')
field_ball
```

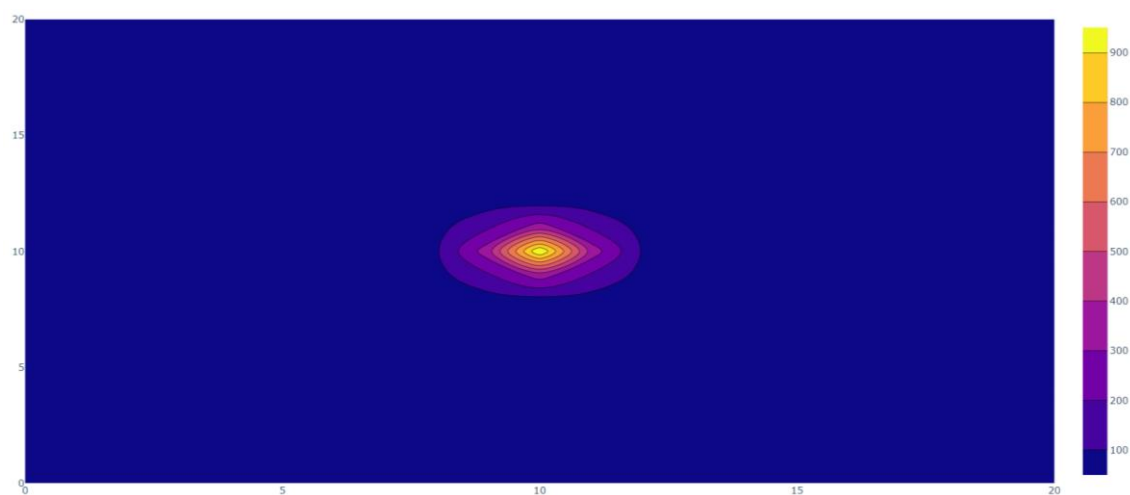
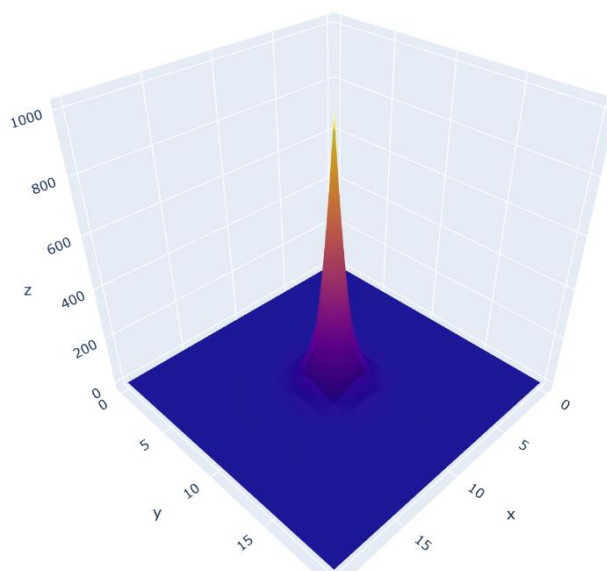
	X	Y	U
0	0	0	0.350918
1	1	0	0.407280
2	2	0	0.471818
3	3	0	0.544331
4	4	0	0.623619
...
436	16	20	0.623619
437	17	20	0.544331
438	18	20	0.471818
439	19	20	0.407280
440	20	20	0.350918

441 rows × 3 columns

Далее создаем функцию для быстрой визуализации данных с помощью контурной карты и 3D поверхности.

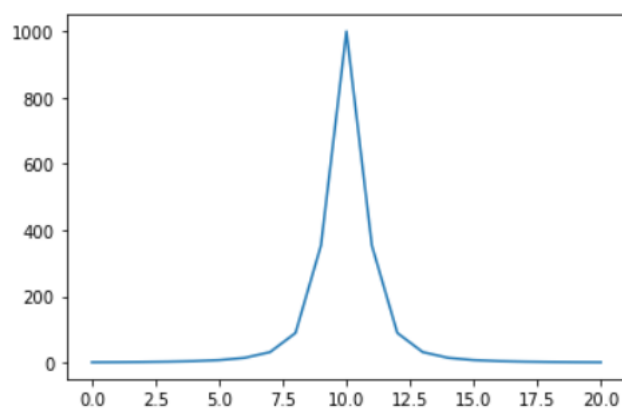
```
: # Выводим 3D поверхность поля и карту изолиний
def map_and_3D(df):
    z_data = df.pivot_table(index='X', columns='Y')
    fig = go.Figure(data=[go.Surface(z=z_data.values)])
    fig.show(renderer='browser')
    fig = go.Figure(data = go.Contour(z=z_data.values))
    fig.show(renderer='browser')

map_and_3D(field_ball)
```



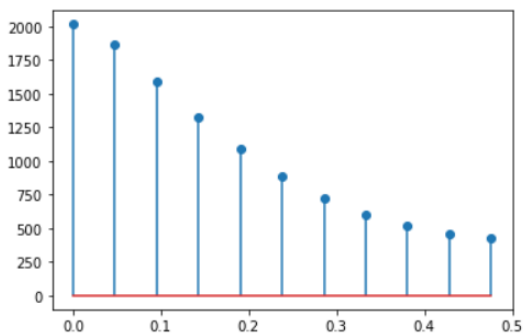
Прежде, чем обрабатывать все поле следует получить корректный результат для одного профиля. Выделим его из данных и изобразим на графике.

```
PR_10 = field_ball.query('Y == 10')
x = PR_10.X
u = PR_10.U
plt.plot(x, u)
plt.show()
```

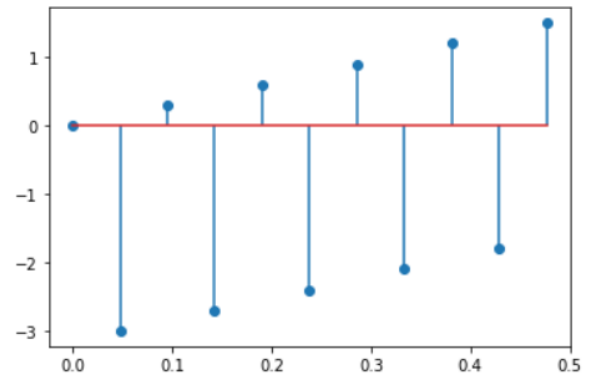


В Python 3.8 существует библиотека с функциями для пересчета в спектр Фурье. Воспользуемся ими и визуализируем полученный результат путем вывода графиков амплитудного и фазового спектра.

```
u = field_ball.query('Y==10').U
F = rfft(u)
Modul = abs(F)
Phase = np.array([cmath.phase(num) for num in F])
freq = rfftfreq(len(u))
plt.stem(freq, Modul)
plt.show()
```



```
: plt.stem(freq, Phase)
plt.show()
```

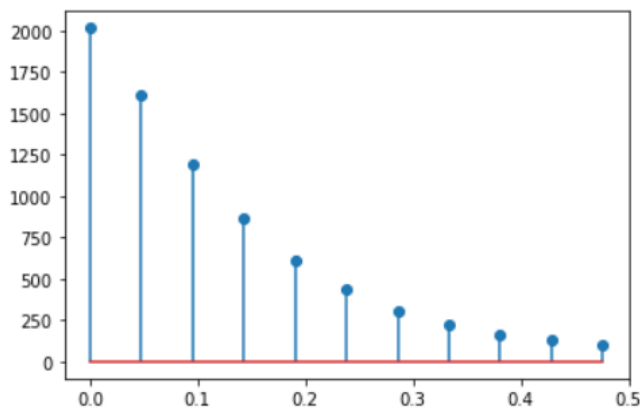


Пересчитаем поле в верхнее полупространство на $h = 3$ и снова визуализируем амплитудную характеристику, чтобы удостовериться в правильности изменений.

```
Modul_tr = np.array([m * math.exp(-1*abs(f)*3) for m, f in zip(Modul, freq)])
Modul_tr
```

```
array([2015.88079398, 1614.56037842, 1196.87664449, 863.9537298 ,
       613.69922052, 434.32728879, 308.41177516, 222.30872159,
       164.50442135, 126.86098171, 103.26995316])
```

```
plt.stem(freq, Modul_tr)
plt.show()
```



Пересчитаем функцию обратно в пространственную область и сравним график полученного поля с исходным.

```

F_tr = np.array([cmath.rect(m, phi) for m, phi in zip(Modul_tr, Phase)])
F_tr
array([[ 2015.88079398 +0.j, -1596.52707298-240.63773768j,
        1143.70277335+352.78558409j, -778.39541386-374.85547471j,
        507.06209176+345.70908054j, -318.38443203-295.4175811j,
        192.29159658+241.12603538j, -111.1543608 -192.52500038j,
        60.10021381+153.13284737j, -28.22922413-123.68031204j,
        7.71737326+102.98118942j])

```

```

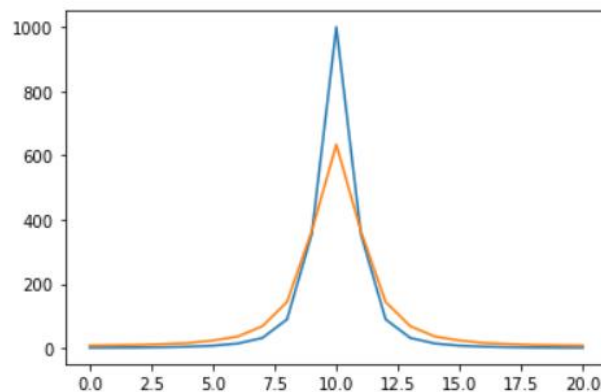
U_tr = irfft(F_tr, len(u))
U_tr
array([[ 8.20228019,  8.93760158, 10.03340401, 12.60891138,
        15.94946983, 23.64215756, 36.04735386, 68.2096104 ,
        143.68301988, 363.64023058, 633.97271543, 363.64023058,
        143.68301988, 68.2096104 , 36.04735386, 23.64215756,
        15.94946983, 12.60891138, 10.03340401,  8.93760158,
        8.20228019])

```

```

plt.plot(x, u)
plt.plot(x, U_tr)
plt.show()

```



Теперь создадим функцию, которая будет обрабатывать таким образом все профили заданного объема геофизических данных.

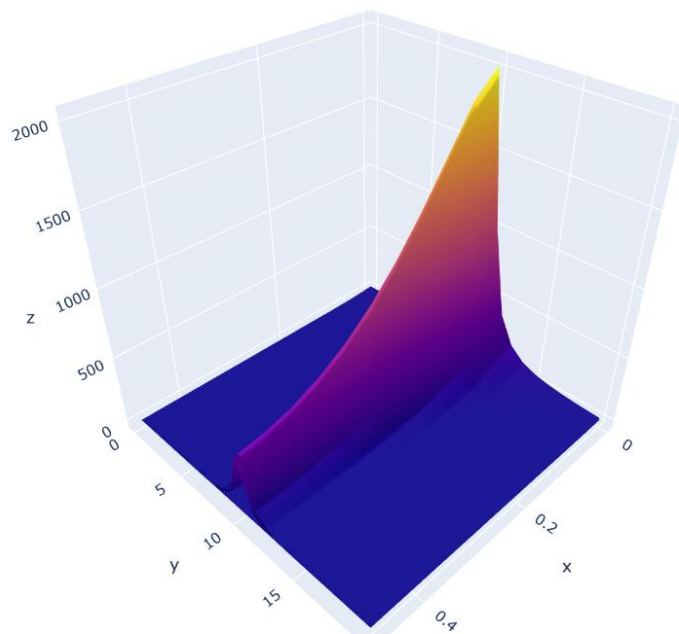
Функция пересчета поля в Фурье спектр:

```

def Furie_Profil(Field, profil_name='Y', field_name='U'):
    Furie_Field = {profil_name : [], 'Freq' : [], 'Modul' : [], 'Phase' : []}
    iter_array = Field[profil_name].unique()
    for i in iter_array:
        Profil_Field = Field.query('{}=={}'.format(profil_name, i))
        U = Profil_Field[field_name]
        F = rfft(U)
        Furie_Field['Modul'].extend(abs(F))
        Furie_Field['Phase'].extend([cmath.phase(num) for num in F])
        Furie_Field['Freq'].extend(rfftfreq(len(U)))
        Furie_Field[profil_name].extend([i for _ in range(len(F))])
    Furie_Field = pd.DataFrame(Furie_Field)
    return Furie_Field

```

3D поверхность полученного Фурье спектра:



Функция пересчета поля вверх на высоту h:

```
def Upper_Field(df, h):
    Furie_Field = df.copy()
    Modul_tr = []
    iter_array = Furie_Field.iloc[:, 0].unique()
    for i in iter_array:
        Profil_Field = Furie_Field.query('{}=={}'.format(Furie_Field.columns[0], i))
        Modul = Profil_Field.Modul.values
        Freq = Profil_Field.Freq.values
        Modul_tr.extend([m * math.exp(-1*abs(f)*h) for m, f in zip(Modul, Freq)])
    Furie_Field['Modul_tr'] = Modul_tr
    del Furie_Field['Modul']
    return Furie_Field
```

Функция для обратного преобразования Фурье:

```
def Furie_Inverse(Furie_Field, Pikets, profil_name='Y', piket_name='X', field_name='U_tr'):
    Field = {piket_name : [], profil_name : [], field_name : []}
    iter_array = Furie_Field[profil_name].unique()
    for i in iter_array:
        Profil_Field = Furie_Field.query('{}=={}'.format(profil_name, i))
        Modul_tr = Profil_Field.Modul_tr
        Phase = Profil_Field.Phase
        F_tr = [cmath.rect(m, phi) for m, phi in zip(Modul_tr, Phase)]
        U_tr = irfft(F_tr, len(Pikets))
        Field[field_name].extend(U_tr)
        Field[piket_name].extend(Pikets)
        Field[profil_name].extend([i for _ in range(len(Pikets))])
    Field = pd.DataFrame(Field)
    return Field
```

Функция для расчета вертикальной производной:

```
def V_z(field, h=1):
    PR_Y = Furie_Profil(field)
    upper_field = Furie_Inverse(Upper_Field(PR_Y, h), field.X.unique())
    df = field.merge(upper_field, on=['X', 'Y'])
    df['V_z'] = df['U'] - df['U_tr']
    return df
```

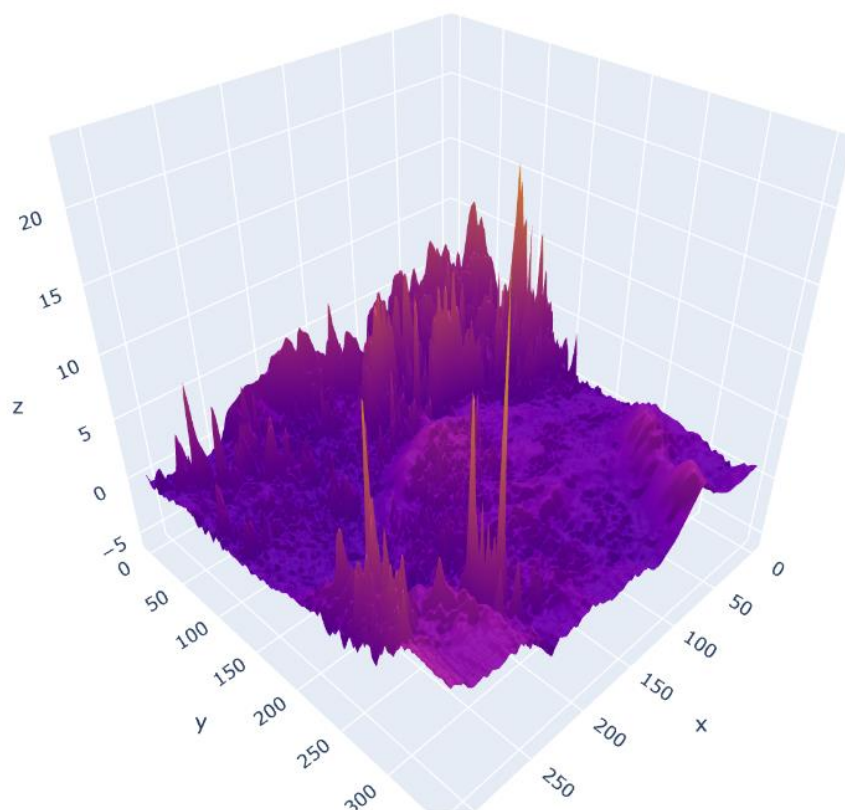
Выгрузим данные реального поля и визуализируем их:

```
real_field = pd.read_excel('D:\\Горный\\Теория поля\\Курсовая\\Реальное_поле.xlsx')
real_field
```

	X	Y	U
0	16450	6240	2.919138
1	16451	6240	2.985610
2	16452	6240	3.108869
3	16453	6240	3.379320
4	16454	6240	3.720608
...
109156	16796	6550	4.186636
109157	16797	6550	4.166988
109158	16798	6550	4.146568
109159	16799	6550	4.138702
109160	16800	6550	4.136179

109161 rows × 3 columns

```
map_and_3D(real_field)
```



Используем созданную функцию:

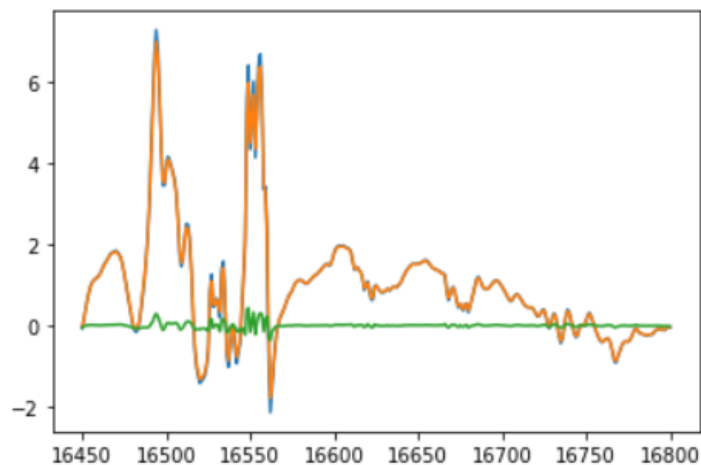
```
Field_V_z = V_z(real_field, h=1)
Field_V_z
```

	X	Y	U	U_tr	V_z
0	16450	6240	2.919138	2.746332	0.172806
1	16451	6240	2.985610	2.958964	0.026646
2	16452	6240	3.108869	3.093712	0.015157
3	16453	6240	3.379320	3.358321	0.020999
4	16454	6240	3.720608	3.649441	0.071167
...
109156	16796	6550	4.186636	4.135221	0.051415
109157	16797	6550	4.166988	4.111409	0.055579
109158	16798	6550	4.146568	4.056707	0.089861
109159	16799	6550	4.138702	4.028646	0.110056
109160	16800	6550	4.136179	3.715380	0.420799

109161 rows × 5 columns

Выведем графики одного из профилей (синяя линия – исходное поле; оранжевая – поле, пересчитанное вверх на $h=1$; зеленая – график вертикальной производной):

```
PR_6350 = Field_V_z.query('Y == 6350')
x = PR_6350.X
u = PR_6350.U
U_tr = PR_6350.U_tr
V_z_pr = PR_6350.V_z
plt.plot(x, u)
plt.plot(x, U_tr)
plt.plot(x, V_z_pr)
plt.show()
```



Запишем полученные данные в файл Excel для дальнейших построений карт.

```
with pd.ExcelWriter('D:\\Горный\\Теория поля\\Курсовая\\V_Z.xlsx') as writer:
    Field_V_z.to_excel(writer)
```


Графические результаты работы

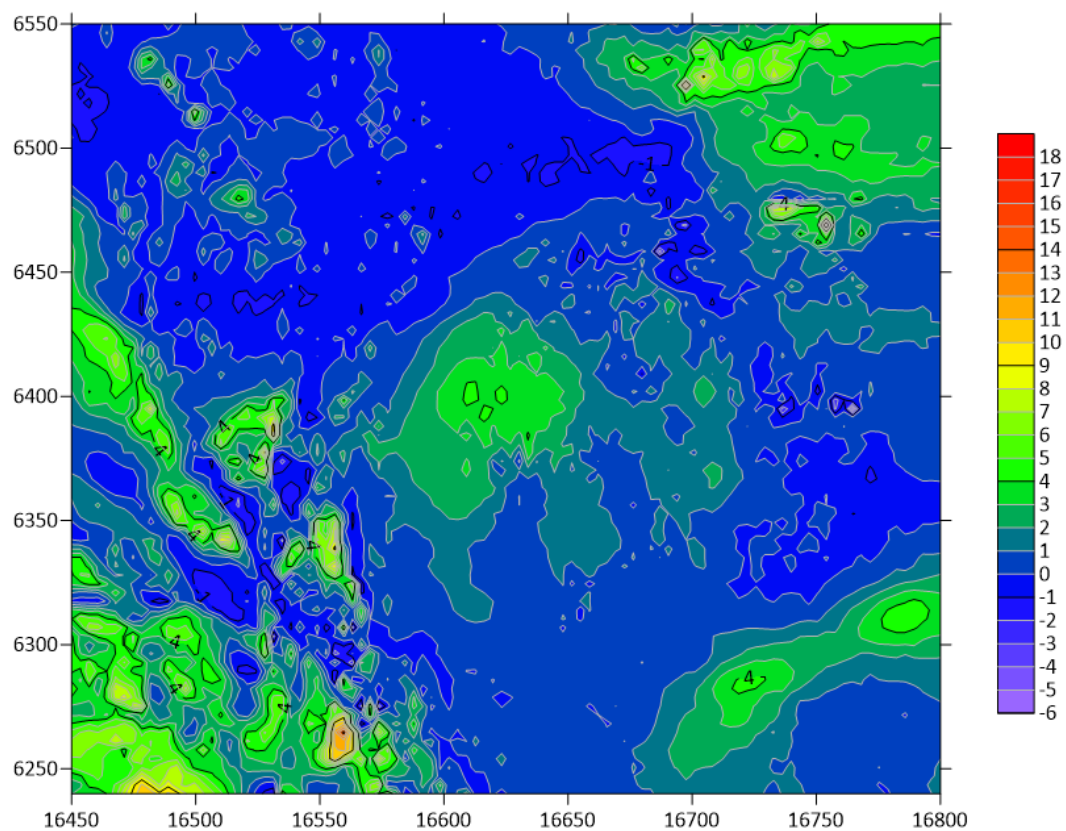


Рис. 1. Карта исходного поля.

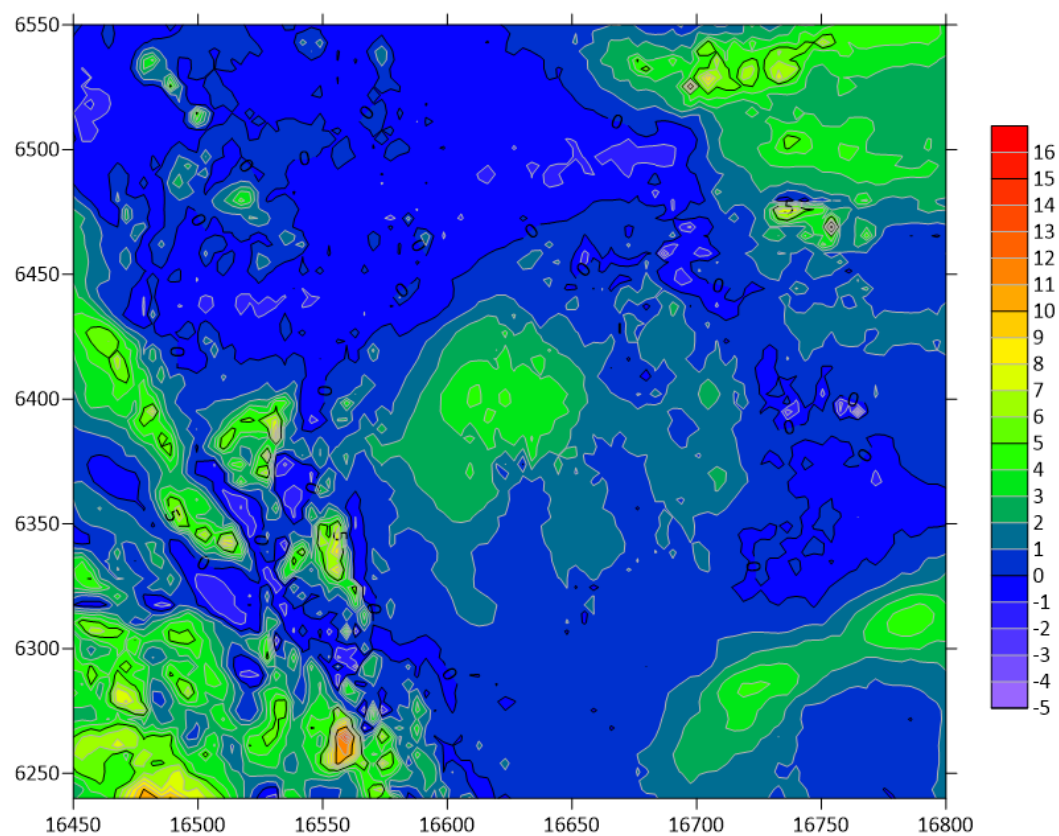


Рис. 2. Карта поля, пересчитанного вверх на $h=1$.

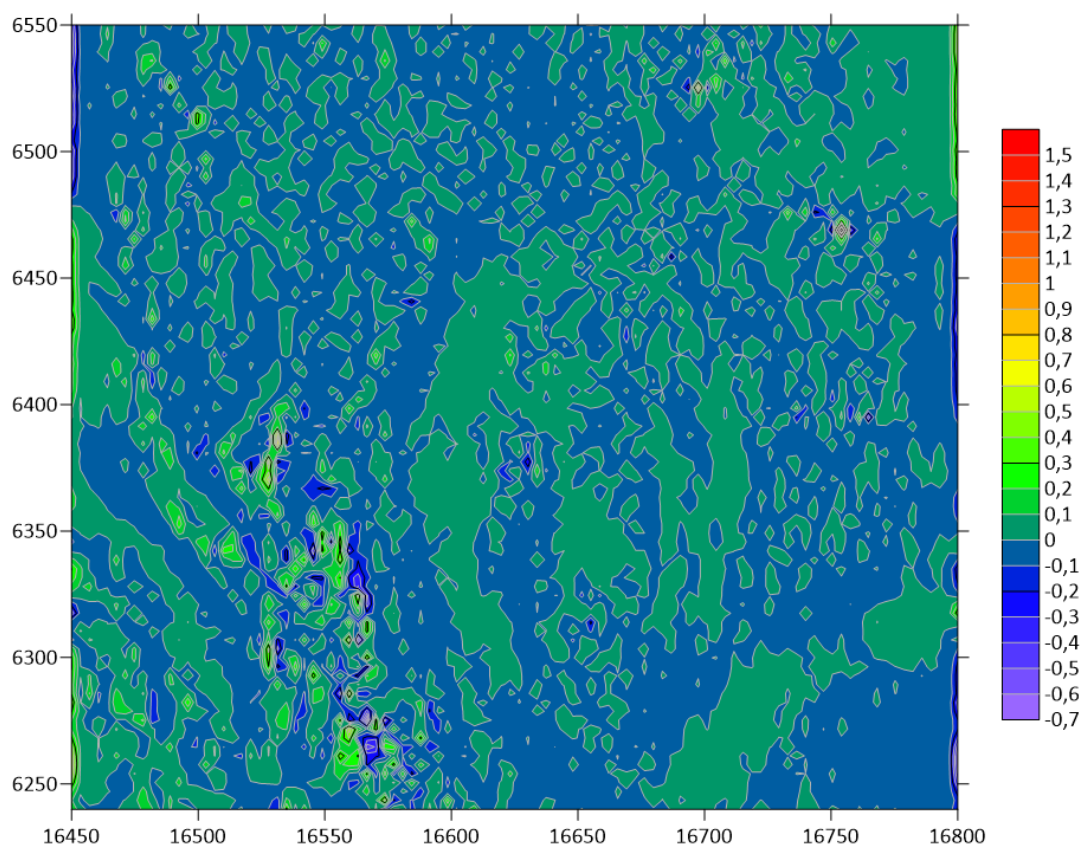


Рис. 3. Карта вертикальной производной.

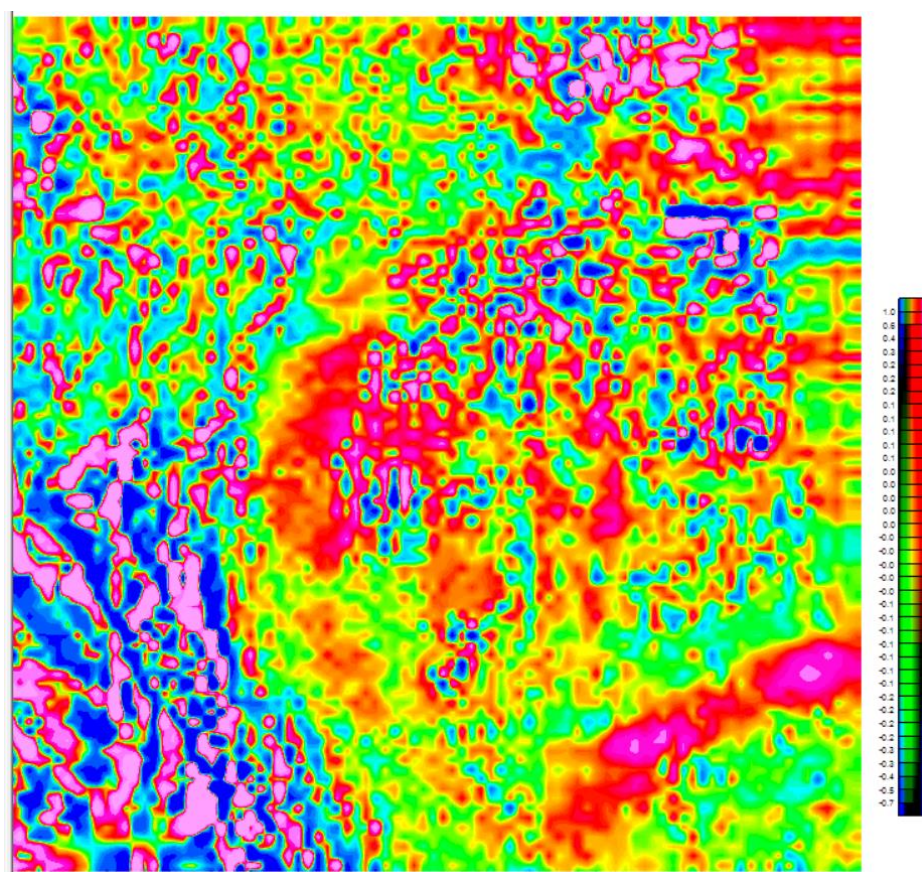


Рис. 4. Карта вертикальной производной, созданная в программе Oasis montaj.

На карте (Рис. 3) вертикальной производной отчетливо выделились локальные аномалии в юго-западной части картированной территории. Карта из программы Oasis montaj немного отличается от получившейся в Surfer, однако эти различия не значительны. На обоих картах самыми отчетливыми оказались аномалии в юго-западной части. Также не стоит забывать, что при расчете вертикальной производной в Oasis montaj применяется радиальное осреднение, которое не было использовано при автоматизации данного процесса в Python 3.8.

Заключение

В ходе данной курсовой работы использовался язык программирования Python 3.8 для автоматизации расчета вертикальной производной и пересчета поля в верхнее полупространство. Для реализации данного процесса использовались некоторые дополнительные библиотеки, расширяющие функциональность Python и позволяющие осуществлять прямое и обратное преобразование Фурье и визуализировать полученные данные.

Итоговые данные были записаны в файл Excel и визуализированы в программе Surfer 19.

Список литературы

1. Путиков О.Ф., Данильев С.М. Теория поля. Учебное издание, СПб, 2013
2. [Geological mapping of Jharia Coalfield, India using GRACE EGM2008 gravity data: a vertical derivative approach](#) J Vaish, [SK Pal](#) - Geocarto International, 2015 - Taylor & Francis
3. [Investigating the structures within the lower Benue and upper Anambra Basins, Nigeria, using first vertical derivative, analytical signal and \(CET\) Center for ...](#) AA Adetona, M Abu - Earth Sci, 2013 - researchgate.net
4. [Investigation of distribution of embedded shallow structures using the first order vertical derivative of gravity data](#) T Gönenc - Journal of Applied Geophysics, 2014 – Elsevier
5. [Coal fire mapping of East Basuria Colliery, Jharia coalfield using vertical derivative technique of magnetic data](#) [SK Pal](#), J Vaish, S Kumar, AK Bharti - Journal of Earth System Science, 2016 - Springer