

Исследование пространственного распределения гравитационного поля Терско-Каспийского прогиба на основе методов F-аппроксимации

И.А. Керимов¹, Э.А. Абубакарова²

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук*

²*Комплексный научно-исследовательский институт
им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук*

Аннотация: В статье рассмотрены алгоритмы аналитических аппроксимаций аномального гравитационного поля на основе метода F-аппроксимации. Приведены результаты опробования методики F-аппроксимации на материалах детальной гравиметрической съемки.

Ключевые слова: гравитационное поле, F-аппроксимация, спектральный анализ, Терско-Каспийский прогиб, Аргуданский участок.

Гравитационное поле Терско-Каспийского прогиба (ТКП) представляет собой систему аномалий различного порядка, отличающихся размерами, интенсивностью, формой и генезисом. Для региона характерно наличие высокоградиентных зон, обусловленных разломными структурами, что обуславливает необходимость изучения пространственного распределения наблюдаемого поля. Результаты интерпретации материалов гравиметрических съемок по территории ТКП показали, что аппроксимационный подход является наиболее эффективным при интерпретации гравиметрических данных [1, 2].

В ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН была разработана современная теория построения аналитических аппроксимаций аномальных геофизических полей на основе метода линейных интегральных представлений [4-14]. Для потенциала аномального гравитационного поля в качестве соответствующего линейного интегрального представления было предложено представление интегралом Фурье (F-аппроксимация). Алгоритмы и компьютерные технологии F-аппроксимации были разработаны И.А. Керимовым [4-8, 11, 13].

Отечественными и зарубежными учеными в теории и практике интерпретации данных гравиметрии и магнитометрии достаточно широко использовались методы обработки и интерпретации данных гравитационных и магнитных наблюдений, основанные на использовании традиционного аппарата спектрального анализа - анализа Фурье.

При использовании традиционного аппарата спектрального анализа предполагалось, что элемент $V(x), x = (x_1, x_2, x_3)$ аномального гравитационного или магнитного поля непрерывно задан на всей бесконечной плоскости $x_3 = 0$ и что однозначно восстанавливается преобразование Фурье $F(u, v)$ элемента $V(x)|_{x_3=0}$:

$$F(u, v) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int V(x)|_{x_3=0} \exp(i(ux_1 + vx_2)) dx_1 dx_2 \quad (1)$$

Существующие аналитические конструкции и методы спектрального анализа использовались для решения большого числа интерпретационных задач гравиметрии и магнитометрии. В большинстве случаев теория и методы интерпретации, основанные на спектральном анализе геофизических данных, оказались неадекватными реальной геофизической практике. Именно, в существующей теории основными являются нереализуемые в вычислительной практике бесконечномерные задачи типа вычисления интегралов Фурье от аномальных полей.

Создание численных методов нахождения спектров Фурье $F(u, v)$, основанных на общей теории метода линейных интегральных представлений, а также новых методах нахождения устойчивых приближенных решений линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности, позволяет принципиально по-новому подойти к использованию метода анализа Фурье в задачах гравиметрии и магнитометрии [4-13].

Метод F- аппроксимации аномальных гравитационных и магнитных полей полностью адекватен реальной геофизической практике и позволяет избавиться от следующих идеализаций: идеализация плоского поля; идеализация границы раздела земля-воздух как бесконечной горизонтальной плоскости; идеализация непрерывного задания того или иного элемента поля на бесконечной горизонтальной плоскости или куске этой плоскости; идеализация задания того или иного элемента поля в узлах правильной геометрической сети и др.

Метод F- аппроксимации основан на использовании спектральных представлений, т.е. на формуле (1) и обратной к ней:

$$T\{V(x)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(u, v) F(u, v) \exp(-i(ux_1 + vx_2)) dudv, \quad (2)$$

где $T\{V(x)\} = W(x)$ есть некоторая линейная трансформанта функции $V(x)$, которой в спектральной области соответствует умножение спектра $F(u, v)$ на частотную характеристику $K(u, v)$.

Рассмотрим основную постановку задачи на нахождение спектров Фурье элементов аномальных потенциальных полей по данным полевых исследований. Рассмотрим случай аномального гравитационного поля и задания значений одного элемента:

$$\Delta g(x) = -\frac{\partial V_a(x)}{\partial x_3}, \quad (3)$$

где

$V_a(x), x = (x_1, x_2, x_3)$ - потенциал аномального гравитационного поля, а ось $0x_3$ направлена вверх, в силу чего в (3) стоит знак минус.

С целью определения спектра $F(u, v)$ вводится спектральное представление функции $\frac{\partial V_a(x)}{\partial x_3}$, гармонической в полупространстве $x_3 > -H$,

через спектр Фурье $F(u, v)$ потенциала $V_a(x)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_a(x)}{\partial x_3} &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(u, v; x_3 + H) F(u, v) \exp(-i(ux_1 + vx_2)) dudv \right\} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(u, v; x_3 + H) (A(u, v) \cos(ux_1 + vx_2) + B(u, v) \sin(ux_1 + vx_2)) dudv. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь положено

$$K(u, v; x_3 + H) = \sqrt{u^2 + v^2} \exp(-(x_3 + H)\sqrt{u^2 + v^2}) \quad (5)$$

и

$$F(u, v) = A(u, v) + iB(u, v). \quad (6)$$

Ниже представлена основная вариационная постановка на нахождение действительной и мнимой частей комплексного спектра Фурье $A(u, v)$ и $B(u, v)$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(u, v)|^2 dudv = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (A^2(u, v) + B^2(u, v)) dudv = \min_{\substack{A(u, v) \\ B(u, v)}} \quad (7)$$

при следующих линейных условиях

$$\begin{aligned} f_{i, \delta} - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(u, v; x_3^{(i)} + H) \times [A(u, v) \cos(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}) + B(u, v) \sin(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)})] dudv = 0, \\ i = 0, 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (8)$$

где положено

$$f_{i, \delta} = V(x^{(i)}) + \delta V_i. \quad (9)$$

Для решения задачи (5-8) используется метод множителей Лагранжа. В данном случае имеют место следующие представления:

$$\begin{aligned} A(u, v) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i P_i(u, v), \\ B(u, v) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i Q_i(u, v), \end{aligned} \quad (10)$$

где положено

$$P_i(u, v) = \frac{1}{2\pi} K(u, v, x_3^{(i)} + H) \cos(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Q_i(u, v) &= \frac{1}{2\pi} K(u, v, x_3^{(i)} + H) \sin(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}), \\ &i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом выражения (5) имеем:

$$A(u, v) = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{2\pi} \sum_{i=1}^N \lambda_i e^{-(x_3^{(i)} + H)\sqrt{u^2 + v^2}} \cos(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i P_i(u, v), \quad (13)$$

$$B(u, v) = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{2\pi} \sum_{i=1}^N \lambda_i e^{-(x_3^{(i)} + H)\sqrt{u^2 + v^2}} \sin(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Q_i(u, v), \quad (14)$$

где

$$P_i(u, v) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{u^2 + v^2} e^{-(x_3^{(i)} + H)\sqrt{u^2 + v^2}} \cos(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}), \quad (15)$$

$$Q_i(u, v) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{u^2 + v^2} e^{-(x_3^{(i)} + H)\sqrt{u^2 + v^2}} \sin(ux_1^{(i)} + vx_2^{(i)}). \quad (16)$$

Значения параметров λ_i находятся из решения СЛАУ:

$$A\lambda = f_\delta, \quad (17)$$

в которой A есть $(N \times N)$ – матрица со свойством

$$A = A^T \geq 0 \quad (18)$$

и элементами a_{pq} , $1 \leq p, q \leq N$:

$$a_{pq} = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} [P_p(u, v)P_q(u, v) + Q_p(u, v)Q_q(u, v)] dudv, \quad (19)$$

а f_δ есть N – вектор с компонентами $f_{i,\delta}$, определенными по формуле (9),

λ – есть N – вектор с компонентами λ_i .

Выражение (19) с учетом (15-16) можно представить в виде:

$$a_{pq} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} (u^2 + v^2) e^{-(x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H)\sqrt{u^2 + v^2}} \cos(u(x_1^{(p)} - x_1^{(q)}) + v(x_2^{(p)} - x_2^{(q)})) dudv, \quad (20)$$

Окончательное выражение для элементов искомой матрицы:

$$a_{p,q} = \frac{6(x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H)^3 - 9((x_1^{(p)} - x_1^{(q)})^2 + (x_2^{(p)} - x_2^{(q)})^2) \cdot (x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H)}{2\pi [(x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H)^2 + (x_1^{(p)} - x_1^{(q)})^2 + (x_2^{(p)} - x_2^{(q)})^2]^{\frac{7}{2}}}. \quad (21)$$

Из изложенного выше следует фундаментальный вывод: элементы матрицы СЛАУ выражаются в элементарных функциях.

Необходимо отметить, что условная экстремальная задача (7, 8) не содержит априорной информации о свойствах погрешностей δV_i в экспериментальных данных. При нахождении устойчивых приближенных решений СЛАУ данные о погрешностях могут быть учтены.

Далее рассматриваются компьютерные технологии построения F- аппроксимации, а также использования полученных аппроксимаций для решения интерпретационных задач гравиметрии и магнитометрии. Компьютерные технологии F- аппроксимации подразделяются на три этапа.

1-й этап – формирование элементов матрицы A . Предварительно с использованием программ сортировки и выборки из исходных пунктов исключаются контрольные пункты ($N_{\text{контр}}$) наблюдений.

Как было показано выше задача построения F – аппроксимационной конструкции вариационной постановкой сводится к решению СЛАУ:

$$A\lambda = f_{\delta}, \quad (22)$$

в которой λ есть N -вектор с компонентами λ_i (множители Лагранжа), f_{δ} есть N -вектор с компонентами $f_{i,\delta}$, A есть $(N \times N)$ – матрица со свойством

$$A = A^T \geq 0 \quad (23)$$

и элементами a_{pq} , $1 \leq p, q \leq N$.

Для F-аппроксимации расчетная формула для вычисления элементов матрицы A выглядит в следующем виде:

$$a_{p,q} = \frac{3(2z_{p,q}^3 - 3\rho_{p,q}^2 z_{p,q})}{2\pi(z_{p,q}^2 + \rho_{p,q}^2)^{3.5}}, \quad (24)$$

где

$$z_{p,q} = x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H,$$

$$\rho_{p,q} = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_1^{(q)})^2 + (x_2^{(p)} - x_2^{(q)})^2}.$$

Диагональные элементы матрицы (когда $p=q$) находятся с использованием следующей формулы:

$$a_{pp} = \frac{3}{16\pi(x_3^{(p)} + H)^4}. \quad (25)$$

На первом этапе вычисляются элементы матрицы A по формулам (24) с использованием программы Matrix пакета прикладных программ SPR. Программа Matrix позволяет вычислять элементы по одной из выбранной из четырех постановок. Данная программа разработана на алгоритмическом языке Fortran-90. По результатам расчета формируются матрица и вектор правой части, а также выдается информация о свойствах матрицы.

2-й этап – решение СЛАУ. Решение СЛАУ является основной вычислительной проблемой при построении F- аппроксимации. Страховым

В.Н разработана новая теория регуляризации СЛАУ, основные положения которой изложены в ряде работ [9-13]. Эти методы решения СЛАУ реализованы в пакете прикладных программ П-СППМ, включающие следующие программы: S-1 (модифицированный классический метод регуляризации для систем с симметрическими положительно полуопределенными матрицами – метод М.М. Лаврентьева); S-5, усовершенствованный метод регуляризации разложения Холецкого); S-6 (итерационный метод) (В.Н. Страхов, А.В. Страхов, 1999).

3-й этап – восстановление поля и нахождение его трансформант. На данном этапе используя значения действительной $A(u,v)$ и мнимой $B(u,v)$ частей комплексного спектра Фурье, которые определяются с использованием формул (13-16) и значений компонент λ_i вектора λ множителей Лагранжа, найденных на основе решения СЛАУ, восстанавливается аномальное поле и рассчитываются различные трансформанты.

Рабочие формулы для вычисления восстановленного поля и нахождения его трансформант находятся из выражения спектрального представления поля в виде функции $V(x)$, гармонической в полупространстве $x_3 > -H$, через спектр Фурье:

$$V(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \sqrt{u^2 + v^2} e^{-z\sqrt{u^2+v^2}} (A(u,v)\cos(ux_1 + vx_2) + B(u,v)\sin(ux_1 + vx_2)) dudv. \quad (26)$$

После очевидных преобразований получим соответствующие формулы. Для вычисления V_z используется следующая формула:

$$V_z(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l}) = \frac{3}{2\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{(2z_{k,l}^2 - 3p_{k,l}^2) \cdot z_{k,l}}{(z_{k,l}^2 + p_{k,l}^2)^{3,5}}, \quad (27)$$

где

$$z_{k,l} = x_{3,k} + \xi_{3,l} + 2H \quad (28)$$

$$p_{k,l} = \sqrt{(x_{1,k} - \xi_{1,l})^2 + (x_{2,k} - \xi_{2,l})^2} \quad (29)$$

$\xi_l = (\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l})$ ($l=1, 2, \dots, M$) – координаты расчетных пунктов,
 $x_k = (x_{1,k}, x_{2,k}, x_{3,k})$ ($k=1, 2, \dots, N$) координаты исходных гравиметрических пунктов.

Полученные формулы (27-29) могут быть использованы как для вычисления элементов поля на исходной поверхности, так и на любом уровне $z > -H$. Третий этап F-аппроксимации реализован в программе Sras.

Результаты опробования на материалах детальной гравиметрической съемки. Для апробации разработанных алгоритмов и программ были использованы материалы детальной гравиметрической съемки масштаба 1:25 000 на Аргуданской площади (западный борт Терско-Каспийского прогиба).

Участок детальной гравиметрической съемки характеризуется достаточно сложным рельефом земной поверхности (рис.1). Высотные отметки на исследуемом участке изменяются от 100 м до 850 м над уровнем моря. На западной половине исследуемого участка рельеф относительно спокойный с отметками 250-300 м над уровнем моря, в то же время на его восточной части рельеф весьма сложный, отметки рельефа здесь изменяются от 300 до 820 м [16, 17].

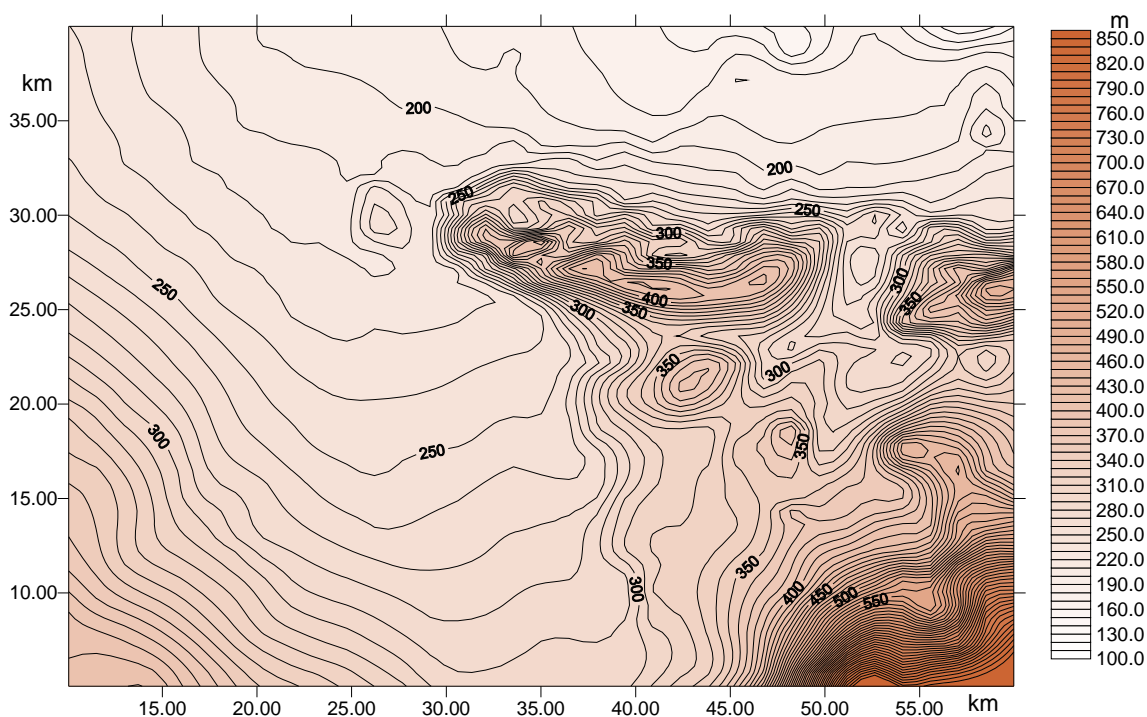


Рис. 1.- Аргуданский участок.
Карта рельефа земной поверхности

Сеть гравиметрических пунктов, схема расположения которой представлена на рис. 2, является крайне нерегулярной и состоит из 7866 пунктов. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 1.83 г/см^3 приведена на рис. 3, из которого видно, что аномальное гравитационное поле имеет сложный характер и изменяется в значительном диапазоне (от -30 до -66 мгал). Для участка детальной гравиметрической съемки характерно наличие аномалий разных размеров и форм, как положительной, так и отрицательной интенсивности [13-15].

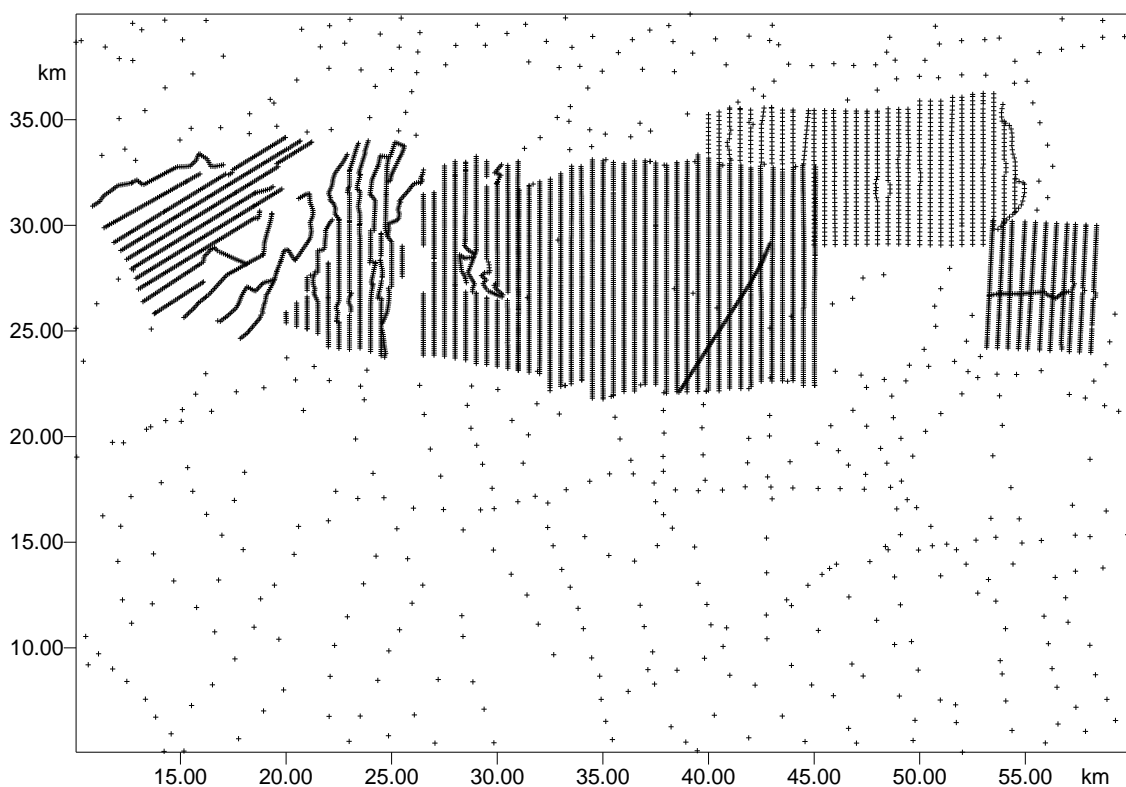


Рис. 2.- Аргуданский участок.

Схема расположения гравиметрических пунктов

По материалам детальных гравиметрических исследований была построена F-аппроксимация, по результатам которой было восстановлено гравитационное поле, практически совпадающее с исходным полем. Результаты аппроксимации характеризуются следующими параметрами: относительная погрешность $\gamma = 0.0015$; среднеквадратическая погрешность $s = 0.079$ мГал. Анализ разностного поля позволяет сделать вывод, что на большей части площади исследований отклонения лежат в диапазоне ± 0.05 мгал (рис. 4). Полученные результаты и анализ карты разностного поля свидетельствуют о высокой точности аппроксимационной конструкции [15].

Данная аппроксимационная конструкция может быть использована для вычисления высших производных и пересчета гравитационного поля на в

верхнее и нижнее полупространство, что позволит решать различные структурно-тектонические задачи, актуальные для ТКП[1-9].

Аналогичные вычисления были выполнены также для других участков ТКП, а также по материалам государственной гравиметрической съемки масштаба 1:200 000.

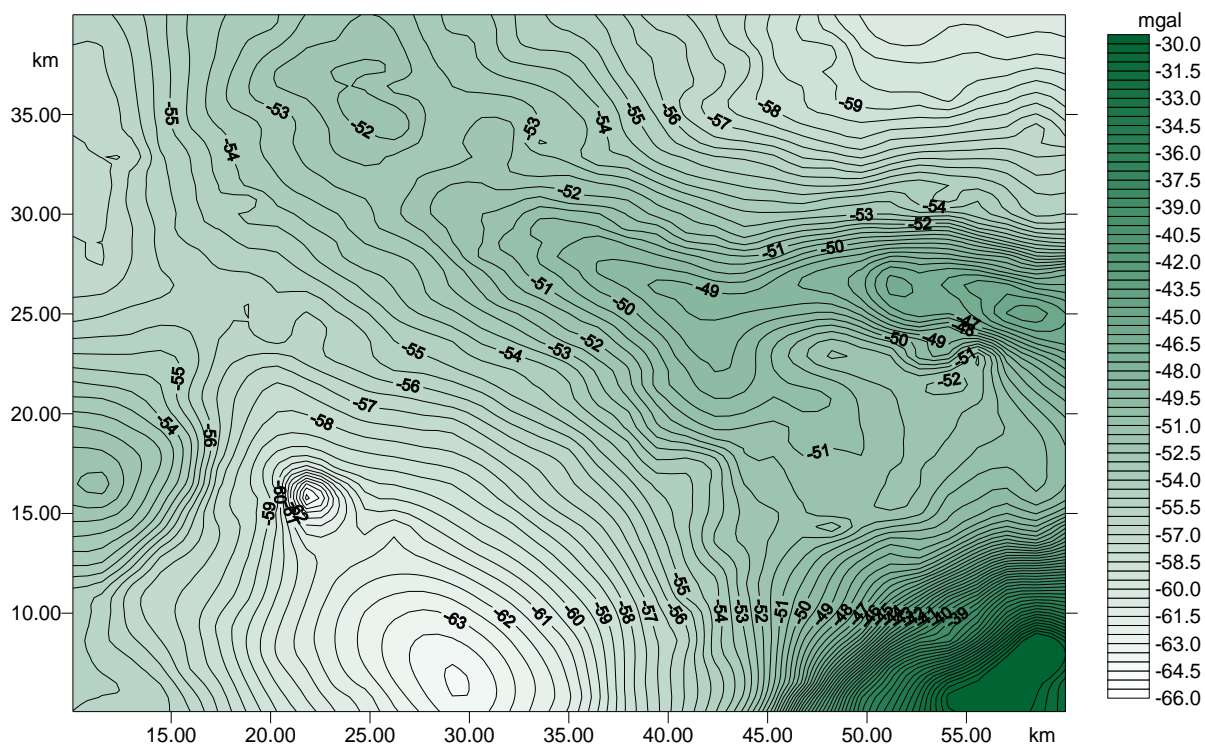


Рис. 3.-Аргуданский участок.

Карта гравитационного поля в редукции Буге ($\sigma=1.83 \text{ г/см}^3$)

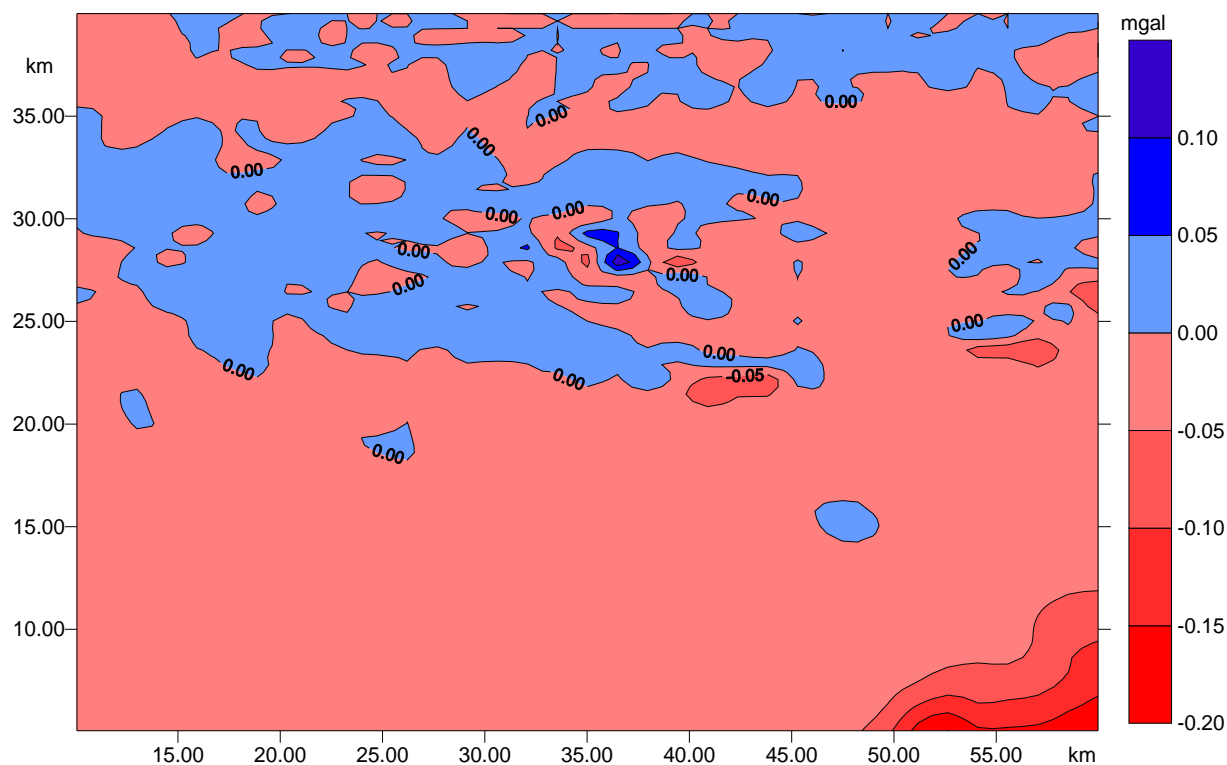


Рис.4.-Аргуданский участок.
Карта разностного поля.

Выводы и рекомендации

Результаты апробирования алгоритмов и компьютерных программ F-аппроксимации на модельных и фактических гравиметрических данных позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты исследований подтверждают теоретические выводы об эффективности аппроксимационного подхода к решению интерпретационных задач гравиметрии и магнитометрии.
2. Разработанные алгоритмы и программы являются эффективным методом спектрального анализа гравиметрических данных, заданных на нерегулярной и разновысотной сети.
3. Результаты исследований на материалах гравиметрических съемок по территории ТКП показали, что метод F-аппроксимации является

эффективным методом изучения пространственного распределения гравитационного поля региона и может использоваться для решения различных геологических задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по конкурсу научных проектов (мол_нр -14-35-50488), выполняемых молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации.

Литература

1. Керимов И.А. Вычисление высших производных гравитационного поля на основе аппроксимации полиномами // Изв. вузов. Нефть и газ, 1987, №4. С.9-13.
2. Керимов И.А. Прогнозирование структурных особенностей глубокопогруженных горизонтов Терско-Каспийского прогиба по данным гравиразведки и сейсморазведки // Изв. вузов. Нефть и газ, 1990, № 11. С.24-30.
3. Керимов И.А. Методологические основы интерпретации данных гравиметрии и магнитометрии // Сборник научных трудов КНИИ РАН. Москва, 2009. С. 258-268
4. Керимов И.А. Метод F-аппроксимации при решении задач гравиметрии и магнитометрии. М.: Физматлит, 2011. 264 с.
5. Керимов И.А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. I. Методика и результаты опробования на модельных примерах // Физика Земли, 2003. №1. С.57-76.
6. Керимов И.А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. II. Результаты опробования на материалах гравиметрических и магнитометрических съемок // Физика Земли, 2009. №.5. С. 77-93
7. Керимов И.А. F-аппроксимации рельефа земной поверхности// Физика Земли, 2009. №.8. С. 101-112.
8. Керимов И.А. Теория и компьютерные технологии аналитических аппроксимаций аномальных потенциальных полей // Геология и геофизика Юга России, 2011. № 2. С.50-63.
9. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Абубакарова Э.А. Характер и геологическая природа гравитационного и магнитного полей Терско-

- Каспийского прогиба. // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1196
10. Страхов В.Н. Геофизика и математика // Физика Земли, 1995. № 12. С. 4-23.
11. Страхов В.Н. Три парадигмы в теории и практике интерпретации потенциальных полей (анализ прошлого и прогноз будущего). М.: ОИФЗ РАН, 1999. 78 с.
12. Страхов В.Н., Керимов И.А. Аппроксимационные конструкции спектрального анализа (F-аппроксимация) гравиметрических данных // Физика Земли, 2001. №12. С.3-20.
13. Страхов В.Н., Степанова И.Э., Керимов И.А. К вопросу о вычислении поправок за рельеф // Физика Земли, 2002. №4. С. 55-66.
14. Страхов В.Н., Керимов И.А., Степанова И.Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей. М.: ИФЗ РАН, 2009. 254 с.
15. Гайрабеков И.Г. Особенности построения геодезических сетей для наблюдения за оседанием земной поверхности в районе добычи нефти и газа. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/369
16. Odegard M.E., Berg J.W. Gravity interpretation using the Fourier integral // Geophysics. 1965. № 30. P. 424-438.
17. Wybraniec S. Transformations and visualization of potential field data // Special papers, Vol. Warszawa, Polish geological inst., 1999. 28 p.

References

1. Kerimov I.A. Izv. vuzov. Neft i gaz, 1987, №4. P.9-13.
2. Kerimov I.A. Izv.vuzov.Neft i gaz 1990, № 11. P.24-30.
3. Kerimov I.A. Sbornik nauchnih trudov KNII RAN. Moskva, 2009.P 258-268.
4. Kerimov I.A. Metod F-approximatsii pri reshenii zadach gravimetrii i magnitometrii [The F-approximations method at the solution of problems of gravitation measurements and a magnetometry]. М.: Fizmatlit, 2011. 264 p.
5. Kerimov I.A. Fizika Zemli, 2003. №1. P.57-76.
6. Kerimov I.A. Fizika Zemli 2009. №.5. P. 77-93.
7. Kerimov I.A. Fizika Zemli, 2009. №.8. P. 101-112.
8. Kerimov I.A. Geologiy i Geofisika Yga Rossii, 2011. № 2. P.50-63.
9. Kerimov I.A., Gaysumov M.Y., Abubakarova E.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1196
- 10.Strahov V.N., Fizika Zemli, 1995. № 12. P. 4-23.
- 11.Strahov V.N. Tri paradigmi v teorii i practike interpretacii potencialnih poley (analiz proshlogo i prognoz budushego) [Three paradigms in the theory and



- practice of interpretation in potential fields (analysis of the past and forecast the future)]. М.: OIFZ RAN, 1999. 78 p.
12. Strahov V.N., Kerimov I.A. Fizika Zemli, 2001. №12. P.3-20.
13. Strahov V.N., Stepanova I.A., Kerimov I.A. Fizika Zemli, 2002. №4. P. 55-66.
14. Strahov V.N., Kerimov I.A., Stepanova I.E. Razrabotka teorii i computernoy tehnologii postroeniy lineynih analiticheskikh approximatsiy gravitacionnih i magnitnih poley [Development of the theory and computer technology to build-linear analytical approximations imants gravitational and magnetic fields]. М.: IFZ RAN, 2009. 254 p.
15. Gayrabekov I.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/369
16. Odegard M.E., Berg J.W. Geophysics. 1965. № 30. P. 424-438.
17. Wybraniec S. Special papers, Vol. Warszawa, Polish geological inst., 1999. 28 p.