

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005)

Оригинальная статья

Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости

И. А. Керимов 

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242, г. Москва, ул.
Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: kerimov@ifz.ru

Статья поступила: 31.10.2022, доработана: 25.11.2022, одобрена в печать: 01.12.2022

Резюме: Актуальность работы. Разработка новых и совершенствование существующих методов интерпретации геофизических данных с целью прогнозирования неструктурных ловушек нефти и газа, обусловленных разломно-блоковой тектоникой, является весьма актуальной задачей многих нефтегазовых регионов, в т. ч. и Предкавказья. **Цель работы.** Решение прямой задачи гравиметрии для геолого-гравиметрических моделей, представляющих собой систему разноориентированных линейных блоков и зон повышенной трещиноватости. Определение оптимальных методов трансформации исходного гравиметрического поля и морфометрического анализа рельефа для выделения систем разломов и линейных зон повышенной трещиноватости для геологических условий Предкавказья. **Методы исследования.** Создание геолого-гравиметрических моделей разломно-блоковой среды, соответствующих разломно-блоковой структуре Терско-Сунженской антиклинальной зоны. Разработка алгоритмов и программ расчета поля силы тяжести и ее производных, основанные на методах В. Н. Страхова решения прямых задач гравиметрии для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел. Тестирование компьютерных программ и апробирование на модельных примерах. Обработка реальных гравиметрических данных с использованием компьютерных программ трансформации поля силы тяжести на основе метода F-аппроксимации. Построение карт вектора горизонтального градиента и третьей вертикальной производной силы тяжести, сопоставление результатов моделирования и фактических геолого-гравиметрических данных, определение признаков трассирования границ разломов и зон повышенной трещиноватости на картах трансформант гравитационного поля и уклона рельефа дневной поверхности. **Результаты исследования.** Созданы типовые геолого-плотностные модели для характерных структур разломно-блокового характера Терско-Сунженской антиклинальной зоны. Разработаны алгоритм и компьютерная программа вычисления элементов аномального гравитационного поля для системы разломов различной ориентировки линейных зон трещиноватости, основанные на идеях решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел В. Н. Страхова. Выполнен расчет аномального гравитационного поля для различного типа моделей. Определены критерии выделения разломов и зон трещиноватости на морфометрических картах и картах высших производных гравитационного поля.

Ключевые слова: гравитационное поле, рельеф, моделирование, разломы, трещиноватость, F-аппроксимация, трансформации, уклон рельефа.

Для цитирования: Керимов И. А. Моделирование гравитационного поля систем разломов и зон трещиноватости. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 59–71. DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005).

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005)

Original paper

Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones

I. A. Kerimov 

Institute of Physics of the Earth RAS, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: kerimov@ifz.ru

Received: 03.11.2022, revised: 25.11.2022, accepted: 01.12.2022

Abstract: Relevance. The development of new and improvement of existing methods for interpreting geophysical data in order to predict non-structural oil and gas traps caused by fault-block tectonics is a very urgent task for many oil and gas regions, including Ciscaucasia. **Aim.** Solution of the direct problem of gravimetry for geological and gravimetric models, which are a system of differently oriented linear blocks and zones of increased fracturing. Determination of optimal methods for transforming the initial gravimetric field and morphometric analysis of the relief to identify fault systems and linear zones of increased fracturing for the geological conditions of Ciscaucasia. **Methods.** Creation of geological and gravimetric models of the fault-block environment, corresponding to the fault-block structure of the Terek-Sunzha anticline zone. Development of algorithms and programs for calculating the gravity field and its derivatives, based on V. Strakhov methods for solving direct problems of gravimetry for field elements from typical approximating bodies. Testing of computer programs and approbation on model examples. Processing of real gravimetric data using computer programs for the transformation of the gravity field based on the F-approximation method. Building maps of the horizontal gradient vector and the third vertical derivative of gravity, comparing the results of modeling and actual geological and gravimetric data, determining signs of tracing fault boundaries and zones of increased fracturing on maps of the gravity field transforms and the slope of the day surface topography. **Results.** Typical geological and density models have been created for the characteristic structures of the fault-block nature of the Terek-Sunzhensky anticline zone. An algorithm and a computer program for calculating the elements of an anomalous gravitational field for a system of faults of various orientations of linear zones of fracture, based on the ideas of solving direct problems of gravimetry and magnetometry for elements of fields from typical approximating bodies V. Strakhov. The anomalous gravitational field was calculated for various types of models. The criteria for identifying faults and fracture zones on morphometric maps and maps of higher derivatives of the gravitational field are determined.

Keywords: gravity field, relief, modeling, faults, fracturing, F-approximation, transformations, relief slope.

For citation: Kerimov I. A. Modeling the gravitational field fault systems and fracture zones. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 59-71. DOI: [10.46698/VNC.2022.44.93.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.44.93.005).

Введение

В связи с сокращением запасов нефти и газа в мезозойских отложениях Северного Кавказа в последние годы весьма актуальным является поиск и разведка залежей УВ, приуроченных к неструктурным ловушкам в кайнозойских отложениях. Тектоника Северного Кавказа имеет сложный разломно-блоковый характер, ловушки УВ, в т. ч. неструктурные в большинстве случаев приурочены к зонам глубинных разломов [Летавин и др., 1987; Rogozhin et al., 2015]. Одним из перспективных направлений на территории Северного Кавказа являются зоны повышенной трещиноватости в верхних горизонтах осадочного чехла [Босиков и др., 2022; Хузин, 2012].

Основным инструментом изучения зон повышенной трещиноватости и связанных с этими зонами микросейсмичности являются геофизические методы [Zaalishvili et al., 2015, 2018]. Одним из эффективных способов прогнозирования зон трещиноватости является детальная гравиметрическая съемка. В связи с этим возникает необходимость совершенствования существующих и разработка новых методов интерпретации гравиметрических данных [Страхов, Керимов, 2001].

В настоящее время существует большое количество методов интерпретации гравитационного поля, большинство из них имеет различные ограничения [Давыденко, Парада, 2022; Долгаль, 2022; Петров, Трусов, 2000; Приезжаев, 2010; Hinze et al., 2014; Jacoby, Smilde, 2014]. Использование аппроксимационного подхода к спектральному анализу, основанного на методе линейных интегральных представлений В. Н. Страхова, позволяет устранить недостатки традиционных методов интерпретации [Страхов, Керимов, 2001; Керимов, 2003, 2009а, б].

Метод F-аппроксимации аномальных гравитационных и магнитных полей, разработанный в рамках метода линейных интегральных представлений В. Н. Страхова, полностью адекватен реальной геофизической практике и позволяет избавиться от различных 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.).

Методика исследования

Разработанный автором в рамках теории интегральных представлений метод F-аппроксимации позволяет принципиально по-новому решать ряд вопросов трансформации потенциальных полей, заданных на нерегулярной и разновысотной сети:

$$W_a(x) \quad x = (x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

Результаты работы и их обсуждение

Результаты апробирования метода на модельных и фактических геофизических данных, заданных на нерегулярной сети, позволили сделать вывод о высокой точности восстановления поля путем F-аппроксимации [Страхов, Керимов, 2001; Керимов, 2003, 2009а, б]. В практике гравиметрических исследований довольно широко используется метод пересчета исходного поля в высшие производные [Elkins, 2014; Hinze et al., 2014; Pasteka et al., 2014; Jacoby, Smilde, 2014].

Как показало моделирование аномального гравитационного поля системы разноориентированных разломов для их трассирования наиболее эффективно использование третьей вертикальной производной W_{zzz} потенциала силы тяжести. Ранее было получено выражение для первой вертикальной производной гравитационного потенциала для заданной произвольной по горизонтали и вертикали сети расчетных точек [Страхов, Керимов, 2001]:

$$W_z(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l}) = \frac{3}{2\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{(2z_{k,l}^2 - 3p_{k,l}^2) \cdot z}{(z_{k,l}^2 + p_{k,l}^2)^{\frac{7}{2}}}, \quad (2)$$

где λ_i – множители Лагранжа;

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

$$z_{k,l} = x_{3,k} + \xi_{3,l} + 2H.$$

Выражение для третьей вертикальной производной потенциала силы тяжести на основе F-аппроксимации выглядит следующим образом:

$$W_{zzz}(\xi_{1,l}, \xi_{2,l}, \xi_{3,l}) = \frac{75}{\pi} \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{z_{k,l}(8z_{k,l}^4 - 40\rho_{k,l}^2 z_{k,l}^2 + 15\rho_{k,l}^4)}{(z_{k,l}^2 + \rho_{k,l}^2)^{5.5}} \quad (3)$$

Данное выражение позволяет находить пространственное распределение W_{zzz} на основе F-аппроксимации в заданной сети расчетных точек (ξ_1, ξ_2, ξ_3) .

При F-аппроксимации рельефа земной поверхности принимается, что в N точках заданы (в декартовой системе координат $0XYZ$) приближенные значения высот $H_i^{(\delta)}$ некоторых точек (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ [Керимов, 2009б].

Принимается, что:

$$H_i^{(\delta)} = H_i + \delta H_i, \quad (4)$$

где

H_i – точные значения высот,

$H_i^{(\delta)}$ – приближенные значения высот,

δH_i – погрешности в задании высот,

и что координаты (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ заданы точно.

Тогда для линейной аппроксимации $\tilde{H}(x, y)$ имеем следующее явное аналитическое выражение в элементарных функциях:

$$\tilde{H}_j(x_j, y_j) = \frac{2\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{(4\varepsilon^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1.5}} \quad (5)$$

где

λ_i – множители Лагранжа;

ε – погрешность аппроксимации.

Значение составляющих уклона рельефа, а также значения модуля и азимута вектора уклона рельефа можно определить по следующим формулам:

$$H_x(x_j, y_j) = \frac{6\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i(x_i - x_j)}{(4\varepsilon^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{2.5}} \quad (6)$$

$$H_y(x_j, y_j) = \frac{6\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i(y_i - y_j)}{(4\varepsilon^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{2.5}} \quad (7)$$

$$H_s = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (8)$$

$$A_s = \arcsin(H_x / H_s) \quad (9)$$

На модельных и практических примерах показана эффективность решения на основе F-аппроксимации широкого круга важных практических задач:

- Восстановление значений потенциальных полей в узлах регулярной сети с учетом разновысотности исходных и результативных точек (3D интерполяция).
- Исключение искажающего влияния аномального вертикального градиента при пересчете наблюдаемого поля на горизонтальную плоскость или любую заданную поверхность.

- Фильтрация помех, нарушающих гармонический характер наблюдаемого потенциального поля.

В рамках теории метода F-аппроксимации разработаны алгоритмы и компьютерные технологии 3D трансформации (вычисление высших производных потенциальных полей, аналитическое продолжение в верхнее и нижнее полупространства элементов потенциальных полей, разделение аномальных полей). Также разработаны алгоритмы и компьютерные технологии F-аппроксимации рельефа земной поверхности, используемые для решения различных задач гравиметрии, магнитометрии, прикладной картографии, геоморфологии и др. На ряде реальных геолого-геофизических материалов оказана эффективность применения гравимагнитных

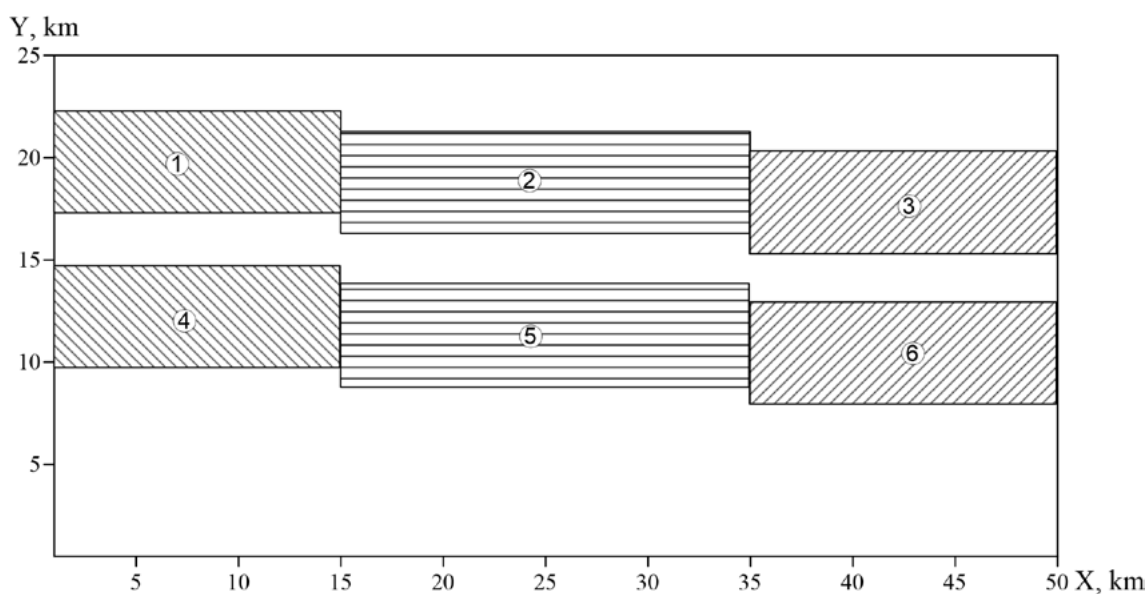


Рис. 1. Модель № 1. Схема расположения вертикальных призм /

Fig. 1. Model № 1. Layout plan of vertical prisms

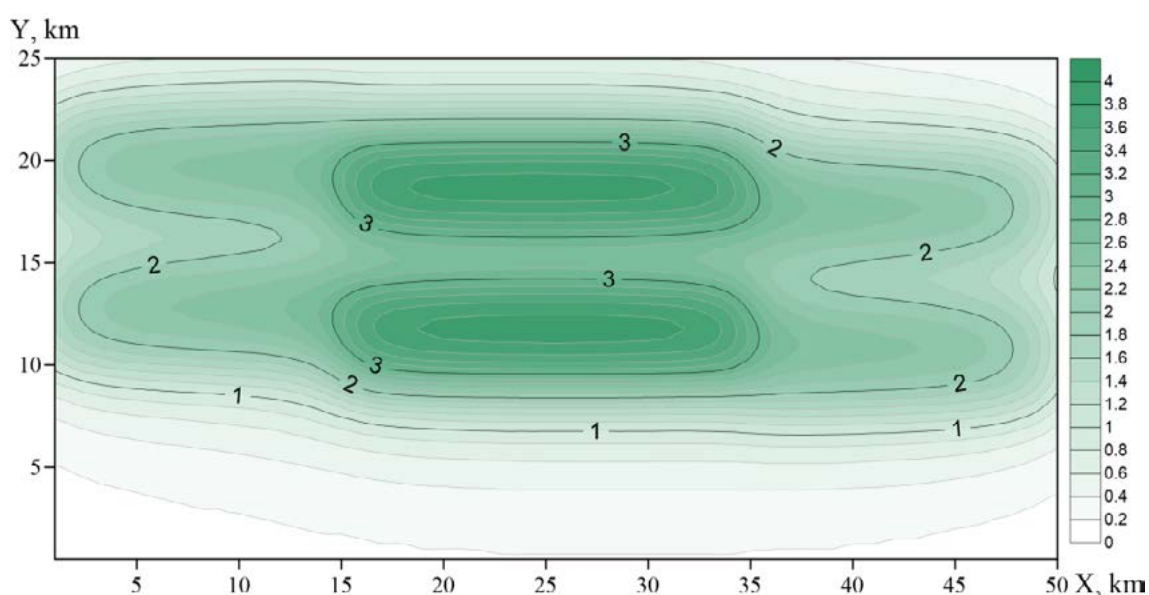


Рис. 2. Модель № 1. Карта аномального поля силы тяжести /

Fig. 2. Model № 1. Map of the anomalous gravity field

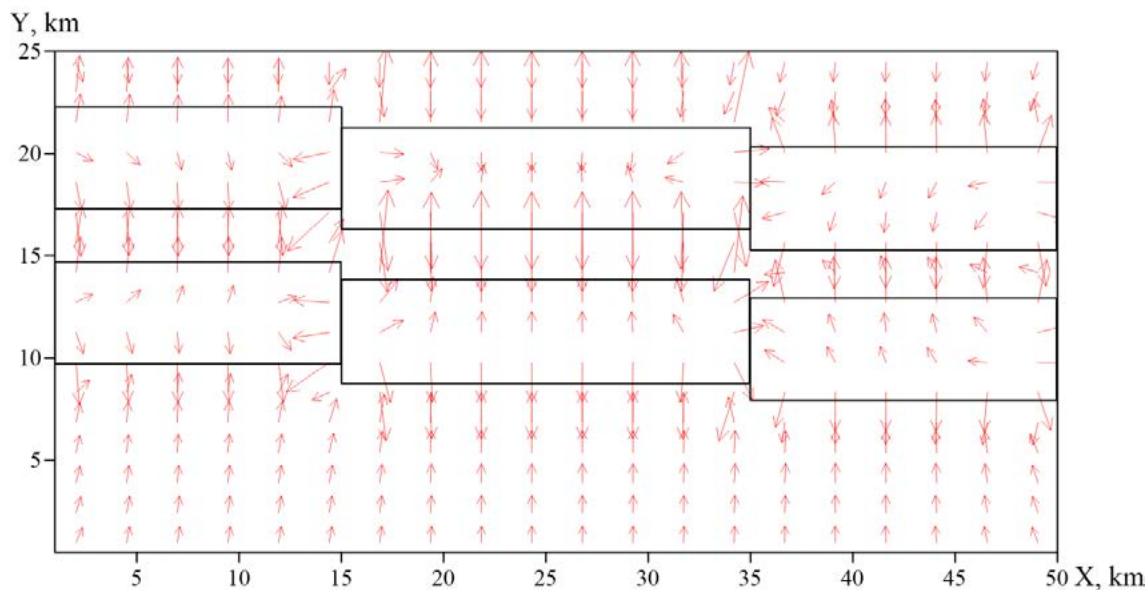


Рис. 3. Модель №1. Карта векторов горизонтального градиента силы тяжести /
Fig. 3. Model №1. Map of horizontal gravity gradient vectors

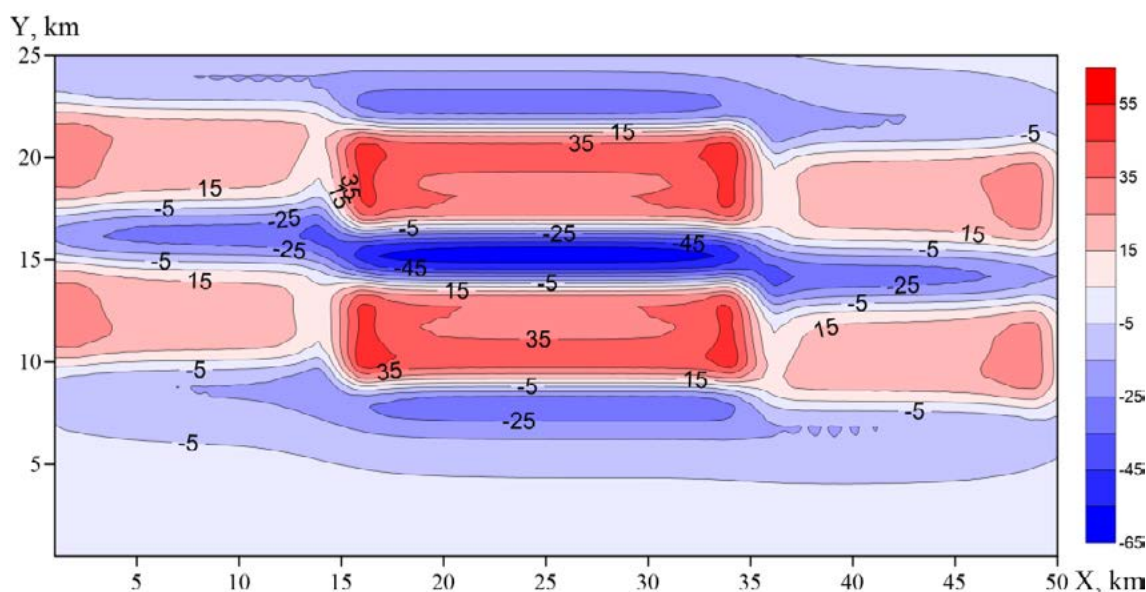


Рис. 4. Модель №1. Карта третьей вертикальной производной W_{zzz} /
Fig. 4. Model №1 Map of the third vertical derivative W_{zzz}

данных для изучения разломной тектоники и прогнозирования нефтегазоперспективных ловушек в глубокопогруженных горизонтах Предкавказья.

Для оценки эффективности гравиметрических методов при изучении систем разломов и зон трещиноватости была разработана серия моделей и рассчитаны аномальное гравитационное поле и его производные. Моделирование аномального гравитационного является довольно широко распространено в теории и практике гравirazведки [Приезжаев, 2010; Mueller et al., 2014; Schmidt et al., 2014]. Моделирование поля силы тяжести для геотермальных месторождений рассмотрено в ряде работ [McDonald et al., 2014; Abiyudo et al., 2003]. Для решения прямой задачи гравirazведки для вертикальных линейных призм различной ориентировки

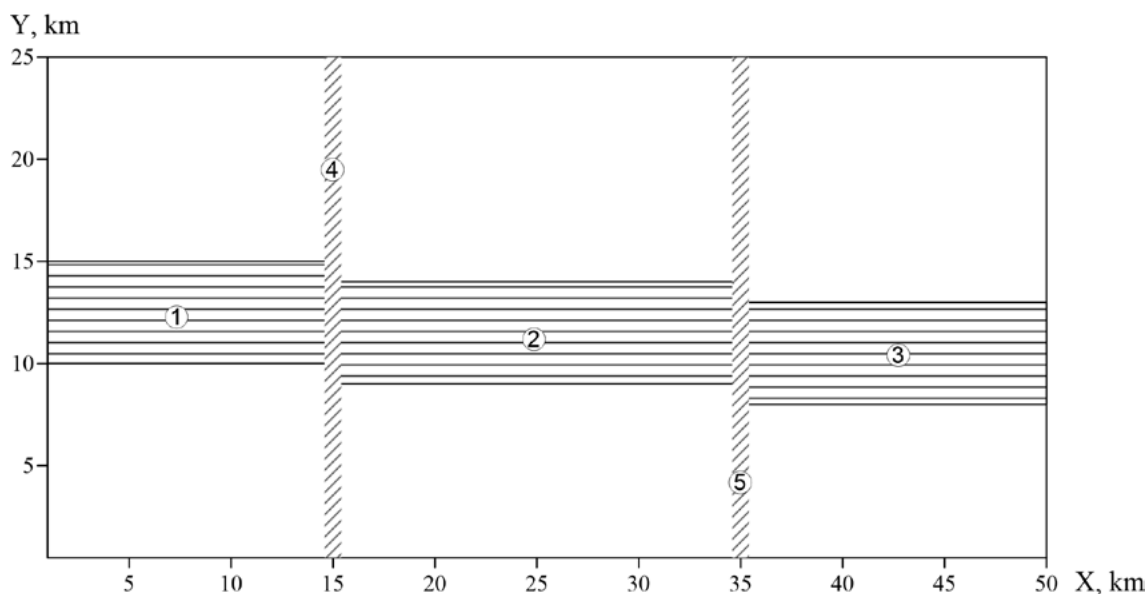


Рис. 5. Модель № 2. Схема расположения вертикальных призм и зон трещиноватости /

Fig. 5. Model № 2. Layout plan of vertical prisms and fracture zones

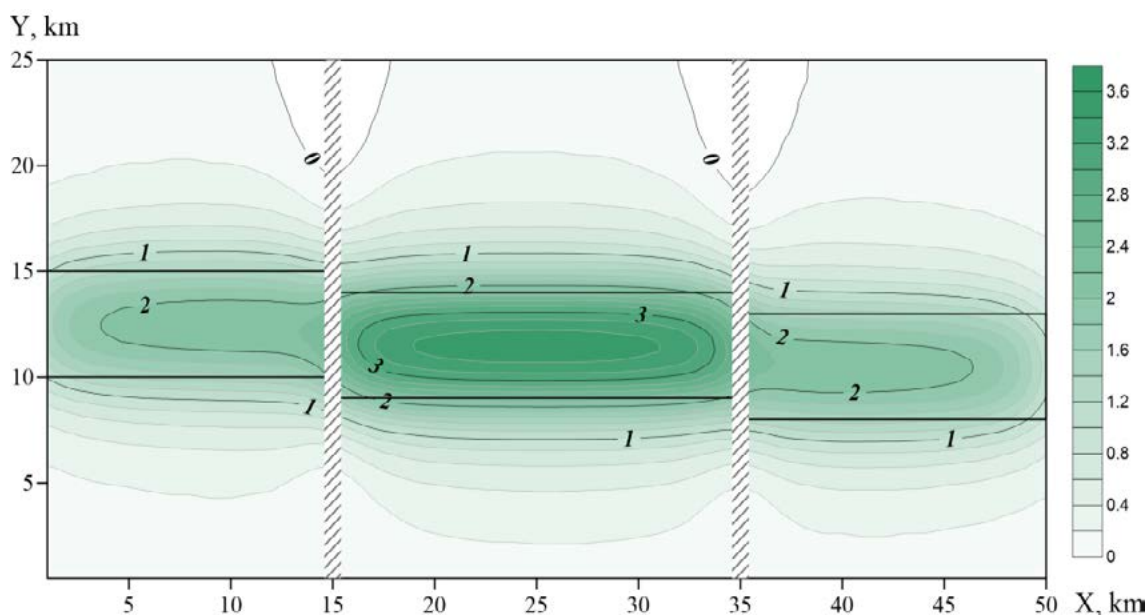


Рис. 6. Модель № 2. Карта поля силы тяжести Δg /

Fig. 6. Model № 2. Map of the anomalous gravity field Δg

была разработана программа, основанная на идеях решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел В. Н. Страхова [Страхов и др., 1986а, б].

На рисунке 1 приведена схема расположения блоков, представляющих в плане два ряда по 3 призматических тела субширотной ориентировки, смещенных относительно друг друга на 1 км. Призмы 1, 3, 4 и 5 имеют одинаковые размеры 5x15 км, глубина залегания верхней грани составляет 2 км, нижней – 5 км. Призмы 2 и 5 имеют размеры 5x20 км, глубина залегания верхней грани составляет 1,5 км, нижней – 5 км.

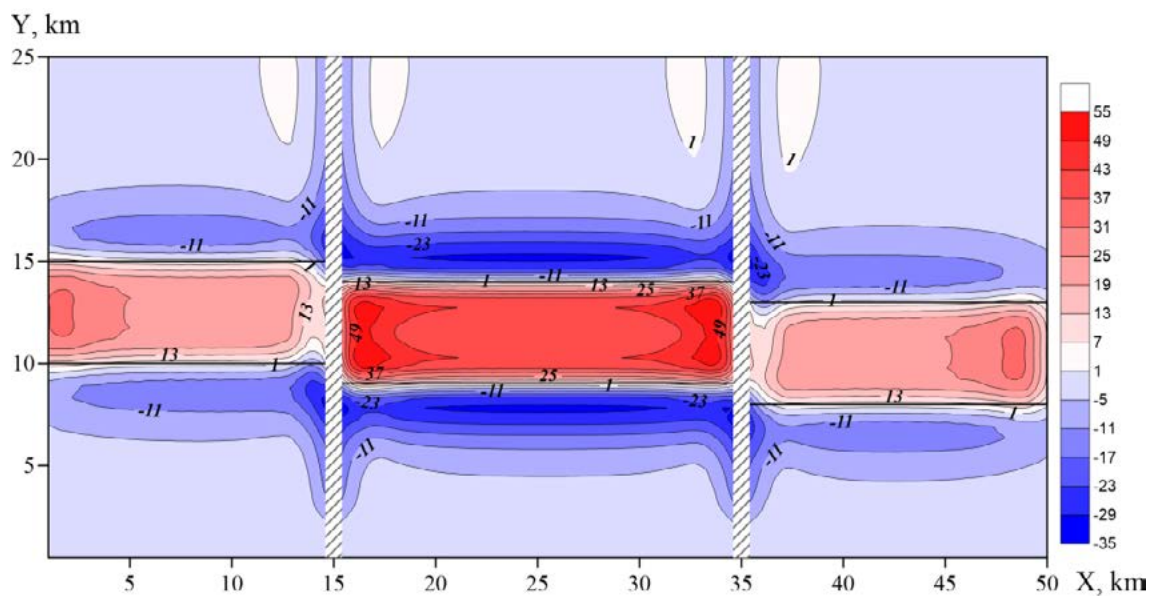


Рис. 7. Модель 2. Карта третьей вертикальной производной W_{zzz} /

Fig. 7. Model № 2. Map of the third vertical derivative W_{zzz}

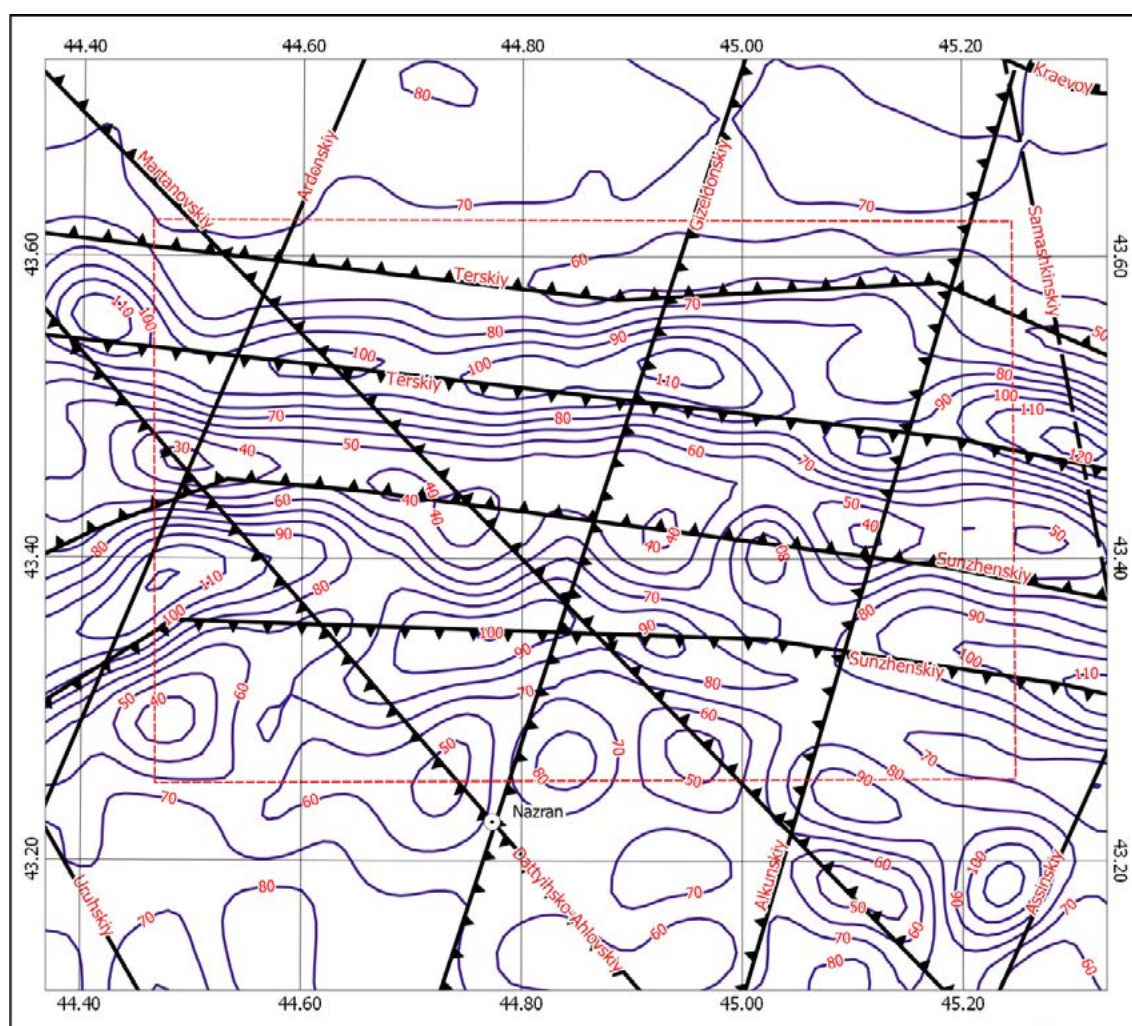


Рис. 8. Карта W_{zzz} и систем разломов западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны /

Fig. 3. Map of W_{zzz} and fault systems of the western part Terek-Sunzha anticline zone

Аномальное поле силы тяжести Δg для данной модели, полученное в результате решения прямой задачи приведено на рисунке 2. На данной карте видно, что аномальное поле вырисовывается в виде сложной аномалии, форма которой не позволяет однозначно выделить границы блоков.

На карте векторов горизонтального градиента силы тяжести (рис. 3) относительно неплохо выделяются субширотные границы, в то же время меридиональные границы выделить однозначно сложно.

На карте третьей вертикальной производной W_{zzz} (рис. 4) границы блоков вырисовываются достаточно четко, хорошо также видно смещение блоков.

На рисунке 5 приведена схема расположения блоков для модели № 2, представляющая в плане один ряд из 3 призматических тел субширотной ориентировки, смещенных относительно друг друга на 1 км, осложненных двумя меридиональными линейными зонами повышенной трещиноватости.

Карта аномального поля силы тяжести Δg для модели № 2 приведена на рисунке 6. На данной карте видно, что аномальное поле вырисовывается в виде сложной аномалии, форма которой не позволяет однозначно выделить границы блоков, зоны трещиноватости также выражены слабо.

На карте третьей вертикальной производной W_{zzz} (рис. 7), построенной для данной модели, достаточно выделяются блоки в виде квазипрямоугольных аномалий. Зоны трещиноватости выделяются в виде линейных отрицательных аномалий.

На рисунке 8 представлена карта W_{zzz} и систем разломов западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны. При выделении разломов следующие признаки на картах аномального гравитационного поля использовались:

- большие градиенты аномального гравитационного поля;
- полосы интенсивных положительных гравитационных аномалий или цепочки максимумов силы тяжести;
- резкая смена простиранья аномалий гравитационного поля;
- резкая смена знаков аномального гравитационного поля;
- смена общего характера гравитационного поля (сложно дифференцированное, слабовозмущенное, почти безаномальное);
- смена линейной формы слабо выраженных аномалий на изометрическую.

На морфометрических картах:

- линейные зоны повышенных уклонов рельефа земной поверхности;
- линейные зоны резкого изменения крутизны рельефа.

На рисунке 9 показано сопоставление схемы разломов, эпицентров землетрясений и рельефа описываемого района Терско-Сунженской антиклинальной зоны.

Выводы

1. Разработаны алгоритм и компьютерная программа вычисления элементов аномального гравитационного поля для системы разломов различной ориентировки, основанные на формулах В. Н. Страхова.

2. Программа протестирована на серии модельных примеров. Установлено, что разломно-блоковая тектоника и зоны повышенной трещиноватости наиболее четко отображаются в поле третьей вертикальной производной W_{zzz} .

3. Метод F-аппроксимации является высокоэффективным методом вычисления высших производных для исходных данных, заданных на нерегулярной в плане и по высоте поля силы тяжести.

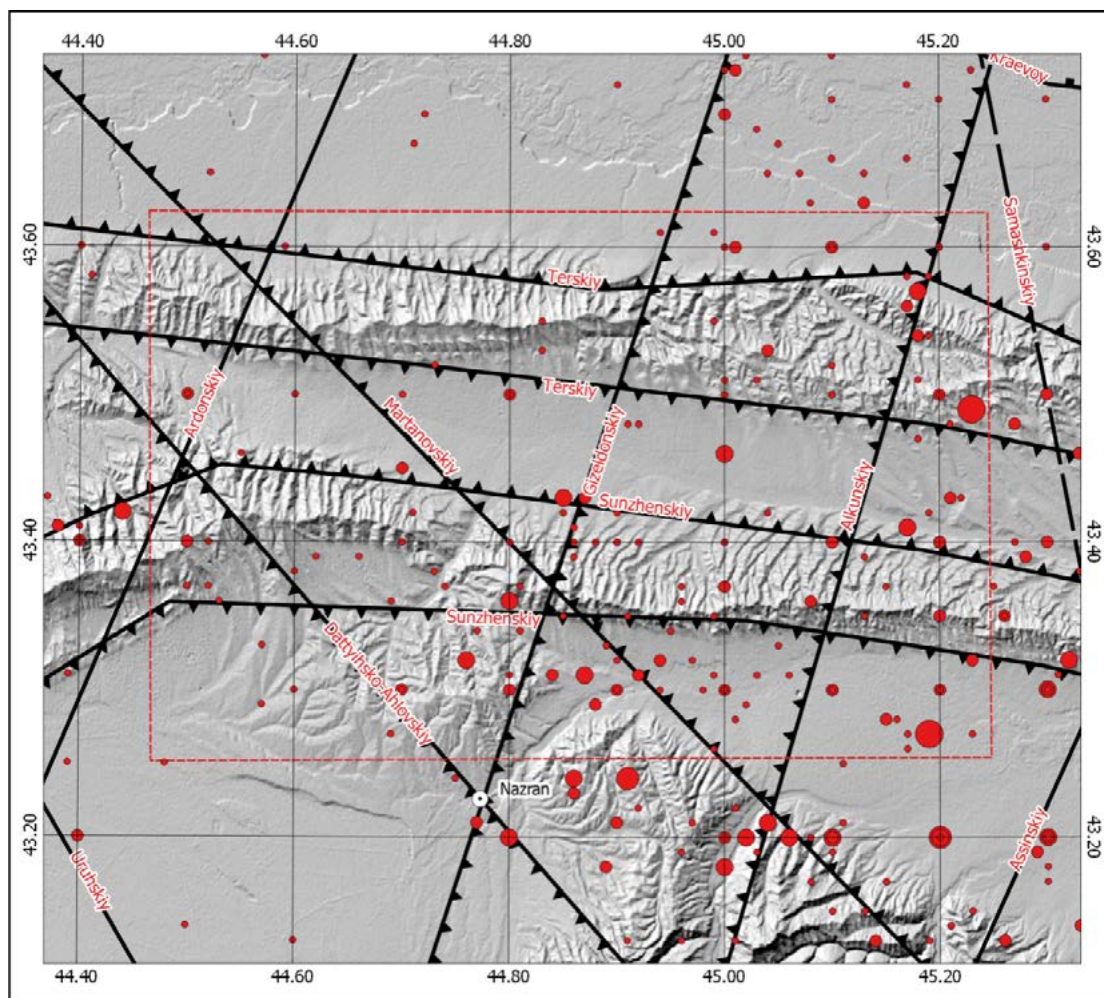


Рис. 9. Карта систем разломов и рельефа западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны /

Fig. 9. Map of fault systems and relief of the western part Terek-Sunzha anticline zone

4. На основе интерпретации поля третьей вертикальной производной W_{zzz} и морфометрического анализа рельефа земной поверхности уточнено расположение разломов для западной части Терско-Сунженской антиклинальной зоны.

5. Эпицентры сильных землетрясений, как правило, отмечаются в узлах пересечения разломов, эпицентры же слабых землетрясений отмечаются внутри блоков.

Литература

1. Босиков И. И., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харьбинского участка (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001
2. Давыденко Д. Б., Парада С. Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 22-37. DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003
3. Долгаль А. С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрических и магнитных съемок в горной местности. – Абакан: ООО «Фирма «Март», 2002. – 188 с.

4. 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.
5. Керимов И. А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. II. Результаты опробования на материалах гравиметрических и магнитометрических съемок. // Физика Земли. – 2009а. – № 5. – С. 77-93.
6. Керимов И. А. F-аппроксимации рельефа земной поверхности. // Физика Земли. – 2009б. – № 8. – С. 101-112.
7. Летавин А. И., Орел В. Е., Чернышев С. М. и др. Тектоника и нефтегазоносность Северного Кавказа. – М.: Наука, 1987. – 95 с.
8. Петров А. В., Трусов А. Н. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трёхмерной геоинформации КОСКАД 3D. // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
9. Приезжаев И. И. Уточнение геологической модели по данным гравитационного поля на основе критериальных методов решения обратных задач. // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 65-68.
10. Страхов В. Н., Керимов И. А. Аппроксимационные конструкции спектрального анализа (F-аппроксимация) гравиметрических данных. // Физика Земли. – 2001. – № 12. – С. 3-20.
11. Страхов В. Н., Лапина М. И., Ефимов А. Б. Решение прямых задач гравиметрии и магнитометрии на основе новых аналитических представлений для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел. Ч. I. // Физика Земли. – 1986а. – № 6. – С. 55-69.
12. Страхов В. Н., Лапина М. И., Ефимов А. Б. Решение прямых задач гравиметрии и магнитометрии на основе новых аналитических представлений для элементов полей от типовых аппроксимирующих тел. Ч. II. // Физика Земли. – 1986б. – № 7. – С. 66-78.
13. Хузин Р. Р. Геотехнологические основы освоения трудноизвлекаемых запасов мелких сложнопостроенных месторождений нефти. – Самара: Нефть. Газ. Новации, 2012. – 384 с.
14. Abiyudo R., Daud Y., Drestanta Y. S. Subsurface Structure Identification from Gravity Modelling of Silangkitang Geothermal Field for Future Injection Well Targeting. // Proceedings. The 2nd Digital Indonesia International Geothermal Convention (DIIGC). – 2021.
15. McDonald, M. R., Gosnold, W. D. Gravity Modeling of the Rye Patch Known Geothermal Resource Area, Rye Patch, Nevada. // GRC Transactions. – 2014. – Vol. 38. – pp. 533-539.
16. Elkins T. A. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. // Geophysics. – 1951. – Vol. 16 (1). – pp. 29-50.
17. Mueller C. O., Wächter J., Jahnke C., Emilio L., Morer P., Riefstahl F., Malz A. Integrated geological and gravity modelling to improve 3-D model harmonization – Methods and benefits for the Saxony-Anhalt/Brandenburg cross-border region (North German Basin). // Geophysical Journal International. – 2021. – Vol. 227. Is. 2. – pp. 1295-1321.
18. Hinze W. J., Frese R. R. B. von Saad A. H. Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. // Cambridge Univ. Press. – 2013.
19. Pasteka R., Richter F. P., Karcol R., Brazda K., Hajach M. Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. // Geophys. Prospect. – 2009. – Vol. 57 (4). – pp. 507-516.
20. Rogozhin E. A., Gorbaticov A. V., Zaalishvili V. B., Stepanova M. Y., Andreeva N. V., Kharazova Y. V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. // Doklady Earth Sciences. – 2015. – No. 462 (1). – pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244
21. Schmidt S., Anikiev D., Götze H.-J., Gómez-García À., Gomez Dacal M. L., Meessen C., Plonka C., Rodriguez Piceda C., Spooner C., Scheck-Wenderoth M. IGMAS+ – a tool for interdisciplinary 3D potential field modelling of complex geological structures. // EGU General Assembly, EGU 2020-8383. – 2020.

22. Jacoby W., Smilde P.L. Gravity Interpretation. // Springer. – 2009. – 411 p.
23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B. V., Morozov F.S., Tuaeov G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. // International Journal of GEOMATE. – 2018. – Vol. 15 (47). – pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A. S., Dzeranov B. V., Shepelev V. D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – Vol. 10 (1). – pp. 1670-1674.

References

1. Bosikov I.I., Klyuev R. V., Gavrina O.A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (1). pp. 6-21. (in Russ.) DOI:10.46698/VNC.2021.36.47.001.
2. Davydenko D.B., Parada S.G. Experience of Dividing Potential Fields of Donbass into Background, Residual and Local Components and some Results of Interpretation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (1). pp. 22-37. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.23.67.003.
3. Dolgal A.S. Computer technologies for processing and interpreting data of gravimetric and magnetic surveys in mountainous areas. Abakan, LLC Firma Mart. 2002. 188 p. (in Russ.)
4. Kerimov I.A. Application of the F-approximation to the gravity data interpretation. I. method and model tests. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2003. Vol. 39. No. 1. pp. 52-70. (англ. Версия)
5. Kerimov I.A. Application of the F-approximation to gravity data interpretation. II. the results of testing with the use of detailed gravity and magnetic surveys. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009a. Vol. 45. No. 5. pp. 444-460. (англ. Версия)
6. Kerimov I.A. F-approximation of the Earth's surface topography. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009b. Vol. 45. No. 8. pp. 719-729. (англ. Версия)
7. Letavin A.I., Orel V.E., Chernyshev S.M. et al. Tectonics and oil and gas potential of the North Caucasus. Moscow. Nauka. 1987. 95 p. (in Russ.)
8. Petrov A.V., Trusov A.N. Computer technology for statistical and spectral-correlation analysis of three-dimensional geoinformation KOSKAD 3D. *Geophysics*. 2000. No. 4. pp. 29-33. (in Russ.)
9. Priezzhaev I. I. Refinement of the geological model according to the data of the gravitational field based on criterial methods for solving inverse problems. *Geophysics*. 2010. No. 1. pp. 65-68. (in Russ.)
10. Strakhov V.N., Kerimov I.A. Approximating constructions in the spectral analysis gravity data: F-approximation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2001. Vol. 37. No. 12. pp. 969-986. (англ. Версия)
11. Strakhov V.N., Lapina M.I., Efimov A.B. Solution of direct problems of gravimetry and magnetometry based on new analytical concepts for field elements from typical approximating bodies. Part I. *Physics of the Earth*. 1986a. No. 6. pp. 55-69. (in Russ.)
12. Strakhov V.N., Lapina M.I., Efimov A.B. Solution of direct problems of gravimetry and magnetometry based on new analytical concepts for field elements from typical approximating bodies. Part II. *Physics of the Earth*. 1986b. No. 7. pp. 66-78. (in Russ.)
13. Khuzin R.R. Geotechnological foundations for the development of hard-to-recover reserves of small complex oil fields. Samara, Oil. Gas. Innovations. 2012. 384 p. (in Russ.)
14. Abiyudo R., Daud Y., Drestanta Y.S. Subsurface Structure Identification from Gravity Modelling of Silangkitang Geothermal Field for Future Injection Well Targeting. In: *Proceedings. The 2nd Digital Indonesia International Geothermal Convention (DIIGC)*. 2021.

15. McDonald, M. R., Gosnold, W. D. Gravity Modeling of the Rye Patch Known Geothermal Resource Area, Rye Patch, Nevada. GRC Transactions. 2014. Vol. 38. pp. 533-539.
16. Elkins T.A. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. Geophysics. 1951. Vol. 16. pp. 29-50.
17. Mueller C. O., Wächter J., Jahnke C., Emilio L., Morer P., Riefstahl F., Malz A. Integrated geological and gravity modelling to improve 3-D model harmonization – Methods and benefits for the Saxony-Anhalt/Brandenburg cross-border region (North German Basin). Geophysical Journal International. 2021. Vol. 227. Issue 2. pp. 1295-1321.
18. Hinze W.J., Frese R. R. B. von Saad A.H. Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. Cambridge Univ. Press. 2013.
19. Pasteka R., Richter F.P., Karcol R., Brazda K., Hajach M. Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. Geophys. Prospect. – 2009. – Vol. 57. pp. 507-516.
20. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova Y. V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. Doklady Earth Sciences. 2015. No. 462 (1). pp. 543-545. DOI: 10.1134/S1028334X15050244
21. Schmidt S., [Anikiev D.](#), [Götze H.-J.](#), [Gómez-García À.](#), [Gomez Dacal M. L.](#), [Meessen C.](#), [Plonka C.](#), [Rodriguez Piceda C.](#), [Spoonner C.](#), [Scheck-Wenderoth M.](#) IGMAS+ – a tool for interdisciplinary 3D potential field modelling of complex geological structures. EGU General Assembly, EGU 2020-8383. 2020.
22. Jacoby W., Smilde P.L. Gravity Interpretation. Springer. 2009. 411 p.
23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., Tuaev G. E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. International Journal of GEOMATE. 2018. Vol. 15 (47). pp. 158-163. DOI: 10.21660/2018.47.20218
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A. S., Dzeranov B. V., Shepelev V. D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. International Journal of GEOMATE. 2016. Vol. 10 (1). pp. 1670-1674.