

## СТАТЬИ

УДК 550.831:681

ПРИМЕНЕНИЕ ЭТАЛОННОГО ТЕЛА  
ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

Васильев П.С.

ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск,  
e-mail:psvasiliev1461@mail.ru

Территориальный и природно-ресурсный потенциал России пропорционален разнообразию видов полезных ископаемых, в первую очередь топливно-энергетических и минеральных ресурсов. Скорость и успешность освоения последних напрямую зависит от развития технологий геофизических методов поисков и разведки. Совершенствование и повышение эффективности указанных методов стоит отнести к актуальным задачам настоящего времени. Даже с появлением высокопроизводительных вычислительных инструментов вопросы ускорения и уменьшения объема используемой вычислительной машиной памяти стоят во главе угла. Актуальность темы статьи обоснована сокращением объема математических вычислений при интерпретации гравитационных аномалий путем применения известных методик интерпретации исходных аномалий. В настоящей статье продолжено научное исследование по ранее опубликованным автором работам, связанным со способами интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с применением взаимно-обратных функций, высокочувствительных к формам источников потенциальных полей. Разработано приложение теоретических методик интерпретации потенциальных аномалий, которые были рассмотрены профессором С.А. Серкеровым в трудах о корреляционных, спектральных, потенциальных методах анализа в грави- и магниторазведке. В статье описаны разработанные двухмерные способы интерпретации гравимагнитных аномалий, чувствительные к форме источников полей, с применением заданного эталонного тела. Рассматриваются способы интерпретации аномалий с упором на наиболее часто применяемые в практических экспериментах эталонные тела: бесконечную горизонтальную материальную линию или горизонтальный круговой цилиндр, также известный в технической литературе под термином «магнитная однополосная линия»; бесконечную горизонтальную материальную полосу, или горизонтальную заряженную полосу; бесконечную вертикальную материальную полосу, или вертикальную заряженную полосу. Нужно отметить, что, помимо применения заданного эталонного тела, методика указанных в статье способов основывается на применении значений взаимно-обратных функций исходных гравитационных и магнитных аномалий.

**Ключевые слова:** гравитационные и магнитные аномалии, взаимно-обратная функция, нормированные значения аномалий, вертикальная или горизонтальная производная, чувствительность к форме тела, эталонное тело

APPLICATION OF A CAUSATIVE BODY REFERENCE  
FOR THE INTERPRETATION OF GRAVITY AND MAGNETIC ANOMALIES

Vasilev P.S.

North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk,  
e-mail: psvasiliev1461@mail.ru

The territorial and natural resource potential of Russia is proportional to the diversity of minerals types, primarily fuel, energy and mineral resources. The speed and success of the development of the latter directly depends on the technologies for geophysical methods of prospecting and exploration. Improving and increasing the efficiency of these methods should be attributed to the actual tasks of the present. Even with the advent of high-performance computing tools, issues of accelerating and reducing the amount of memory used by a computer are at the forefront. The relevance of the paper topic is substantiated by the reduction in the amount of mathematical calculations in the interpretation of gravity anomalies by applying the well-known methodologies for interpreting the initial anomalies. This paper continues the scientific research on previously published by the author works related to methods of interpreting gravitational and magnetic anomalies using mutually inverse functions that are highly sensitive to the forms of potential field sources. An application of theoretical methods for interpreting potential anomalies has been developed, which were considered by Professor S.A. Serkerov in his works on correlation, spectral, and potential methods of analysis in gravity and magnetic exploration. The paper describes the developed two-dimensional methods for interpreting gravitational and magnetic anomalies, sensitive to the shape of field sources, using a given causative body. Methods for interpreting anomalies are considered with an emphasis on the most commonly used causative bodies in practical experiments: an infinite horizontal material line or a horizontal circular cylinder, also known in the technical literature under the term magnetic unipolar line; an endless horizontal material strip, or a horizontal charged strip; an infinite vertical material strip, or a vertical charged strip. It should be noted that in addition to using a reference body, the methodology of the methods indicated in the article is based on the use of the values of mutually inverse functions of the initial gravitational and magnetic anomalies.

**Keywords:** gravitational and magnetic anomalies, mutually inverse functions, normalized anomaly values, vertical or horizontal derivative, solid shape sensitivity, causative body reference

Процесс извлечения данных из результатов полевых гравитационных и магнитных наблюдений и экспериментов весьма трудоемок. Современные приборы способ-

ны обеспечивать высокую точность определения значений исследуемых свойств и параметров пород. Но теория гравиразведки, а именно интерпретации потенциальных

полей, не вполне успевает за развитием техники [1]. Данные, полученные с приборов, представляют собой набор карт и графиков, содержащих материал о составе, свойствах пород и геологическом строении исследуемого участка. Стоит отметить, что указанные наборы данных сами по себе нельзя назвать полной геологической информацией. После получения наборов данных начинается процесс интерпретации, состоящей из аналитических и синтетических процедур. Интерпретация геофизических полей позволяет выяснить природу аномалий, связать аномалии с геологическими процессами, которые, в свою очередь, привели к образованию наблюдавшихся объектов. Также интерпретация аномалий позволяет определить размеры и глубины залегания источников [2]. Автором предлагается аналитический метод, основанный на математических методах обработки данных [3, 4]. Разработанный метод позволяет сократить объемы математических вычислений, тем самым решить упомянутую проблему отставания теории гравиразведки от возможностей современной аппаратуры [1]. На основе существующей теоретической базы о гравитационном и магнитном потенциалах можно утверждать, что процесс интерпретации гравитационной или магнитной аномалии более эффективен при анализе исходного поля совместно с производными: горизонтальными, вертикальными, первого или второго порядков. Природа источников аномалии может быть различной в зависимости от физических свойств, например намагниченности, глубины залегания, формы, размеров тел. Обратная задача гравиразведки решается для уточнения геологического строения разреза пород [5]. Определение формы эталонного тела перед началом процесса интерпретации оптимизирует и значительно уменьшает неоднозначность решения обратной задачи гравиразведки. Однозначное решение обратной задачи возможно в некоторых случаях, когда фактор одновременного влияния нескольких источников гравитационных аномалий исключается из математических расчетов [6], например в случае, если определяются параметры уступа на поверхности слоя пород или известна избыточная плотность рельефа местности. В данной работе рассматривается способ применения эталонного тела для повышения однозначности решения обратной задачи в сложных геологических средах и получения достоверной информации о местоположении источников аномального поля.

Цель исследования – анализ возможностей применения эталонного тела для решения обратной задачи магниторазведки и гравиразведки.

### Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования применяется физико-геологическая модель нефтеносной структуры, приведенная в работе [7] профессора С.А. Серкера. Для совершенствования существующих методов интерпретации аномалий силы тяжести разработаны двухмерные способы интерпретации гравимагнитных аномалий, чувствительных к форме источников полей. Ниже рассмотрены разработанные способы, в которых используются значения взаимно-обратных функций нормированных аномалий – значения горизонтальных координат  $X_a$ ,  $X'_a$ , определяемые равенствами:

$$X_a = f(V_z(x)_H), \quad (1)$$

$$X'_a = g(V_{xz}(x)_H), \quad (2)$$

где  $V_z(x)_H$ ,  $V_{xz}(x)_H$  – нормированные значения гравитационной аномалии и ее первой производной. На рисунках 1а, 1б представлены графики изменений упомянутых значений:

$$C_2 = X_{\text{ГП}} / X_{\text{МЛ}} \text{ и } C_2 = X_{\text{ВП}} / X_{\text{МЛ}}, \quad (3)$$

где  $X_{\text{ГП}}$ ,  $X_{\text{ВП}}$ ,  $X_{\text{МЛ}}$  – значения взаимно-обратных функций  $X_a$  бесконечных горизонтальной, вертикальной полос и материальной линии, рассчитанных из формул, приведенных в [4] при различных значениях  $a$ .

Параметры кривых: значения  $l / h$  и  $\Delta h / h$ , где  $l$  – ширина полосы,  $h$  – глубина залегания;  $\Delta h = h_2 - h_1$  где  $h_1$  и  $h_2$  – глубины залегания верхней и нижней кромок полосы. Кривые с параметрами 0 в обоих графиках соответствуют случаю, когда интерпретируемая кривая является аномалией от тела той же формы, что и эталонное, а именно от бесконечной горизонтальной материальной линии. Указанные кривые во всех точках принимают постоянное значение, равное 1.

Сравним графики, представленные на рисунках 2а, 2б. Изменение значений  $C_2$  для аномалий от бесконечных материальных горизонтальных и вертикальных полос имеют разные формы: в первом случае они являются возрастающими, во втором – убывающими. Этот признак, то есть разные формы кривых, позволяет относительно легко определить формы тела, а затем и их параметры  $l / h$  и  $\Delta h / h_1$  (по той же методике, что и по кривым  $C_1$ ) [4].

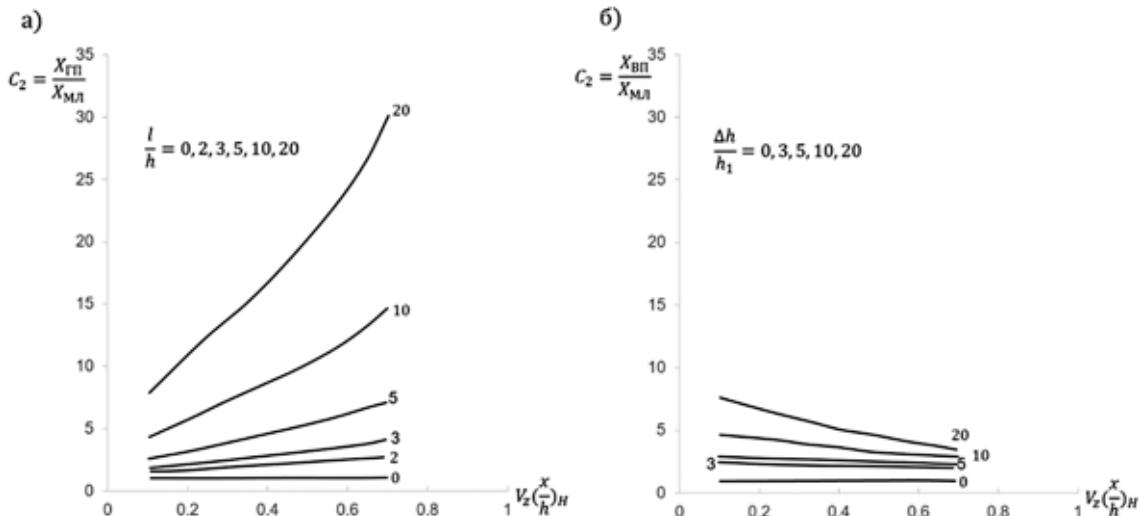


Рис. 1. кривые  $C_2$ : а – бесконечная горизонтальная полоса; б – бесконечная вертикальная полоса

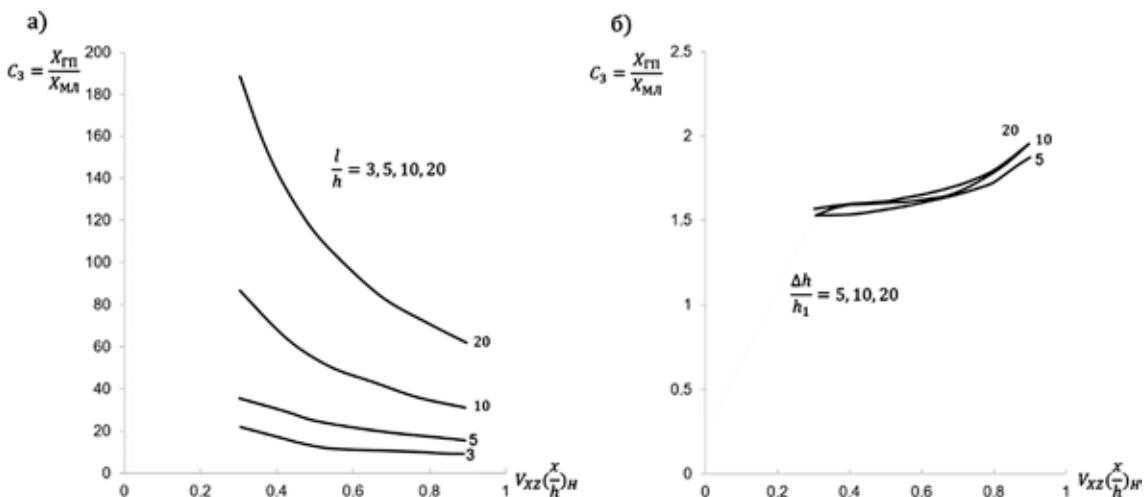


Рис. 2. Кривые  $C_3$ : а – горизонтальная полоса; б – вертикальная полоса

На рисунке 2 приведены кривые изменения значений функции:

$$C_3 = X'_{BP} / X'_{ML} \text{ и } C_3 = X'_{BP} / X'_{ML} \quad (\text{случаи а, б соответственно}) \quad (4)$$

где  $X'_{BP}$ ,  $X'_{ML}$  – рассчитанные в статье [4] значения взаимно-обратных функций для нормированной горизонтальной производной исходной аномалии  $V_{xz}$ , см. формулу (2). В этом случае кривые для разных аномалий (случаи а, б) отличаются разной формой, что также можно использовать для определения формы тела. Параметрами кривых также являются отношения  $l / h$  и  $\Delta h / h_1$ .

По кривым рисунка 2а можно легко определить параметры  $l / h$ . В случае, представленном на рисунке 2б, параметр  $\Delta h / h_1$  можно определить только в благоприятных случаях, поскольку кривые, соответствующие разным параметрам, мало отличаются друг от друга.

В случае применения эталонного тела нужно знать также нормированные значения аномалий. Для нахождения аномалий определяется глубина залегания указанного эталонного тела. В соответствии с ранее выполненными автором расчетами [4], глубина залегания полосы определяется значениями  $h$  и  $h_1$ , которые можно получить посредством спектральных способов, из-

ложенных в работе [7], например по угловому коэффициенту асимптоты, проведенной к точкам  $\ln|S(\omega)|$  в области высоких частот, где  $S(\omega)$  – спектр аномалии. Зная  $h$  или  $h_1$ , можно определить  $V_z(x)_H$  по следующей формуле:

$$V_z(x)_H = h^2 / (h^2 + x^2), \quad (5)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Разработанные аналитические способы позволяют интерпретировать аномалию силы тяжести от нефтегазоносной структуры. Рассмотрим пример, представленный на рисунке 3.

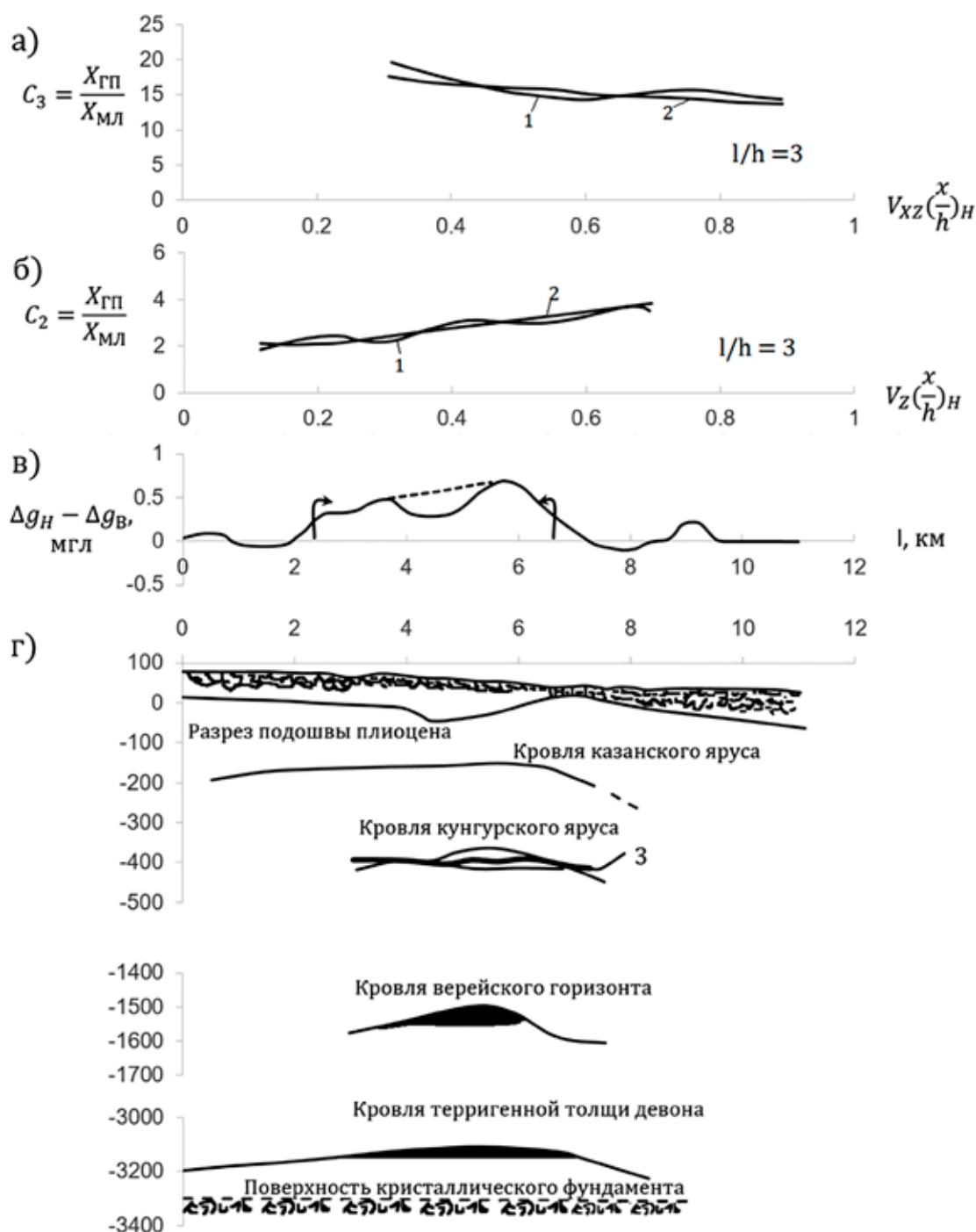
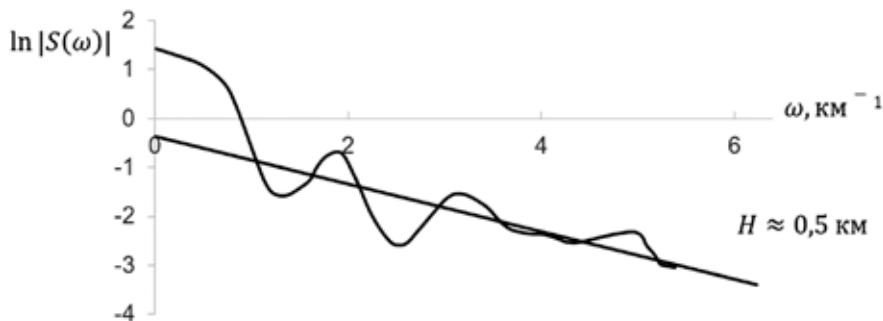


Рис. 3. Интерпретация гравитационной аномалии

Рис. 4. График  $\ln|S(\omega)|$  аномалии силы тяжести

На рисунке 3в представлена кривая остаточной аномалии нефтегазоносной структуры. Поверхностные неоднородности представлены здесь пунктирной линией. По этой кривой были найдены значения первой производной аномалии  $V_{xz}$ . Кривые  $V_z$  и  $V_{xz}$  были нормированы, после чего определены значения горизонтальных координат  $X_a$  и  $X'_a$ . По этим значениям были построены кривые  $C_2$  и  $C_3$ , представленные на рисунках 3а и 3б (кривые под цифрами 1 и 2). Эти кривые по своим формам подходят к кривым рисунка 1а и рисунка 2а. Следовательно, рассматриваемую аномалию можно аппроксимировать бесконечной горизонтальной полосой. Кривые, обозначенные цифрами 1 и 2, на обоих графиках лучше всего совпадают с линиями, соответствующими параметру  $l/h = 3$ .

Значения  $h$  можно определить из графика  $\ln|S(\omega)|$  (рис. 4) или из выражений для горизонтальной полосы:

$$X_3 = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(l^2 - h^2) + 2\sqrt{l^2 + l^2 h^2 + h^4}} = \\ = \pm \frac{h}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\left(\frac{l}{h}\right)^2 - 1\right) + 2\sqrt{\left(\frac{l}{h}\right)^4 + \left(\frac{l}{h}\right)^2 + 1}} \quad (6)$$

где  $X_3$  – абсциссы экстремумов  $V_{xz}$ ,  $X_{1/2}$  – абсциссы точек с координатой, равной  $1/2\Delta g_{\max}$ .

Для рассматриваемого примера  $X_3 = 1,3$  км найдена из графика  $(V_{xz})_H$ , а из (6)  $X_3 = 3h$ , откуда  $h \approx 0,43$  км,  $2l = 2X_3 = 2,6$  км. Аномалия силы тяжести подходит для аппроксимации. Возникновение указанной аномалии вызвано бесконечной горизонтальной полосой. Ширина полосы –  $2l = 2h \approx 2,6$  км; глубина залегания –  $h = 0,43$  км. Вернемся

к рассмотрению рисунка 3. Цифра 1 отмечает интерпретацию посредством метода хорд. Интерпретированная аномалия также связана с горизонтальной полосой. В качестве параметров можно привести глубину залегания полосы –  $h = 0,42$  км и ширину полосы –  $2l = 3,3$  км. На рисунке 3г представлена схема залегания пород, по оси абсцисс – ширина полосы в километрах, по оси ординат – глубина залегания. Под цифрой 3 на указанном рисунке обозначается аномальное тело, интерпретированное с применением предложенного метода. Результат интерпретации соответствует глубине и горизонтальным размерам залегания пород кунгурского яруса.

### Заключение

Методы гравиразведки и магниторазведки особенно важны при поисках месторождений полезных ископаемых. Представлен способ совершенствования существующих методов анализа и интерпретации. Отличительной чертой разработанных способов интерпретации гравимагнитных аномалий является высокая чувствительность к форме источников. Указанная особенность, в первую очередь, позволяет определить форму тел, что расширяет возможности интерпретации, затем их параметры. Это стало возможным посредством взаимно-обратных функций нормированных аномалий и заданного эталонного тела. Необходимо отметить эффективность применения предложенных методов интерпретации на практических материалах, показывающих гравитационное поле нефтегазоносных структур. Представленный результат интерпретации аномалии поля соответствует породам кунгурского яруса, но стоит отметить, что данный метод подходит также и для других источников гравитационных полей.

**Список литературы**

1. Балк П.И. Аддитивные технологии количественной интерпретации гравитационных аномалий // Геофизика. 2016. № 1. С. 43-47.
2. Sindirgi P., Ozyalin S. Estimating the location of a causative body from a self-potential anomaly using 2D and 3D normalized full gradient and Euler deconvolution. Turkish Journal of Earth Sciences. 2019. V. 28. P. 640-659.
3. Васильев П.С., Серкера С.А. Способ интерпретации гравимагнитных аномалий с применением взаимообратных функций нормированных гравимагнитных аномалий // Ученые записки. Серия: Строительство. Горное дело. Геофизика. 1994. С. 70-77.
4. Васильев П.С. О способах интерпретации, высокочувствительных к форме источников потенциальных полей // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2021. №3 (23). С. 66-72.
5. Долгаль А.С. Аддитивные технологии локализации источников геопотенциальных полей // Вестник Пермского университета. 2019. Том 18. № 4. С. 380-385.
6. Петрищевский А.М. Три образа мышления и три подхода к интерпретации гравитационных аномалий // Региональные проблемы. 2014. Том 17. № 2. С. 5-17.
7. Серкера С.А. Корреляционные методы анализа в гравиразведке и магниторазведке. М.: Издательство "Недра", 1986. 247 с.