

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПО АНОМАЛИЯМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Иван Александрович Инжеватов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант, тел. (913)382-54-13, e-mail: inzhewatov.iw@yandex.ru

В связи с необходимостью использовать вертикальный градиент при обработке результатов гравиметрических измерений и их интерпретации при решении задач геологии, геофизики, геодезии, геодинамики и навигации кроме актуальных задач усовершенствования, так называемых косвенных методов измерений вертикального градиента, возникает не менее актуальная задача разработки методов определения вертикального градиента силы тяжести, использующих зависимости между различными физическими полями, например, в которой используется зависимость аномалий силы тяжести от высоты. В статье представлена разработка и исследование метода определения вертикального градиента по аномалиям силы тяжести используя связь аномалий силы тяжести с высотой по полевым материалам, выполненным в районе Таштагольского месторождения на горе Буланже в 2019 и 2020 годах.

Ключевые слова: сила тяжести, вертикальный градиент, аномалия силы тяжести, средняя аномалия, поправки в свободном воздухе

DETERMINATION OF THE VERTICAL GRADIENT OF GRAVITY FROM GRAVITY ANOMALIES

Ivan A. Inzhewatov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate Student, phone: (913)382-54-13, e-mail: inzhewatov.iw@yandex.ru

In connection with the need to use the vertical gradient in the processing of the results of gravimetric measurements and their interpretation when solving problems of geology, geophysics, geodesy, geodynamics and navigation, in addition to the urgent problems of improvement, so-called indirect methods of measuring the vertical gradient, there is an equally urgent task of developing methods for determining the vertical gradient of gravity, using dependencies between different physical fields. The article presents the development and study of a method for determining the vertical gradient from gravity anomalies using the relationship between gravity anomalies and altitude based on field data obtained in the area of the Tashtagol field on Mount Boulanger in 2019 and 2020.

Keywords: gravity, vertical gradient, gravity anomaly, mean anomaly, corrections in free air

Введение

Зависимость силы тяжести от высоты исследовали многие ученые как в России, так и за рубежом. Численное изменение силы тяжести по вертикали имеет большое значение при определении фигуры Земли и характеристик гравитационного поля с относительной погрешностью порядка квадрата земного сжатия

в геофизики и геологии. В различные годы в отечественной и зарубежной литературе активно обсуждается вопрос о способах определения и применения вертикального градиента силы тяжести [3, 6, 9-12].

Этот вопрос имеет большое практическое значение, поскольку использование вертикального градиента значительно расширяет возможности локализации и интерпретации аномалий гравиметрической съемки. Вертикальный градиент обладает большей разрешающей способностью по сравнению с аномалиями силы тяжести; с их помощью более четко выделяются локальные аномалии в гравитационном поле над источниками этого поля [5]. Кроме того, распределение измеренного вертикального градиента силы тяжести на земной поверхности позволят повысить точность приведения измеренных значений ускорения силы тяжести к отсчетной поверхности, а также найти среднюю кривизну уровенных поверхностей. Как отмечено в работе [7] особое значение приобретает знание вертикального градиента силы тяжести при измерении силы тяжести на подвижном основании (аэрогравиметрия, инерциальная гравиметрия и т.д.). Однако, при интерпретации аномалий гравитационного поля относительно редко используют измеренные значения вертикального градиента силы тяжести, а при редуцировании ускорений силы тяжести на отсчетную поверхность используют нормальный вертикальный градиент. Как показано в работах [1, 2], отклонения измеренного вертикального градиента гравитационного поля от нормального на различных станциях наблюдений и даже площадях могут достигать значительных величин (от 2824 до 3439 Е и больше), следовательно, их легко можно заметить и измерить. Бычков С. Г. в работе [4] указывает на необходимость более точного учета вертикального градиента гравитационного поля при высокоточных работах. Сложившаяся ситуация обусловлена тем, что даже при современном уровне техники не удается создать прибор для непосредственного измерения вертикального градиента силы тяжести, из-за высоких требований к стабильности параметров вертикального градиентометра. Разработка его продолжается.

Теоретические основы определения вертикального градиента силы тяжести по аномалиям силы тяжести

В работах, посвященных определению вертикального градиента силы тяжести по аномалиям силы тяжести предполагается, что эти аномалии заданы на плоскости и в большинстве работ за исходную принята формула Б.В. Нумерава [8]

$$\frac{dg}{dz} = -\frac{1}{2\pi} \int da \int (\Delta g - \Delta g_0) \frac{dl}{l^2}, \quad (1)$$

где Δg_0 – аномалия силы тяжести в исследуемой точке;

Δg – аномалия силы тяжести в текущей точке на плоскости;

l и α – полярные координаты текущей точки.

Эта формула имеет ряд недостатков.

Во-первых, эта формула бесполезна в геодезии при современной точности измерений, где требуется знать вертикальный градиент с точностью порядка сжатия Земли. Во-вторых, она может быть использована только в равнинных районах. В-третьих, учитывая основное свойство гравитационного поля, что при удалении от притягивающих масс, измерения силы тяжести на вертикально разнесенных пунктах, позволяют наблюдать изменения гравитационного поля, обусловленные только приповерхностными плотностными неоднородностями, в то же время удаленные вариации плотностных неоднородностей либо не влияют на измерения силы тяжести, либо влияют на вертикально разнесенные пункты одинаково и, таким образом, одновременно учитываются в результатах измерения силы тяжести.

В этой работе предложено для определения вертикального градиента силы тяжести V_{zz} использовать известное в природе гравитационного поля свойство – зависимости аномалий силы тяжести с редукцией в свободном воздухе $\Delta g_{св.в.}$ от высоты H .

Косвенное измерение вертикального градиента силы тяготения V_{zz} , обусловленного аномальной массой, расположенной внутри вмещающих пород в толще над выработанным пространством, с помощью гравиметров типа ГНУ-К2, разнесенных на разные высоты с целью определения глубины и плотности аномальной массы в толще вмещающих масс в провале над выработанным пространством может привести к ложным результатам.

Эту зависимость аномалий силы тяжести от высоты в некоторой области можно определить с помощью уравнения следующего вида

$$\Delta g_{св.в.} = a + bH, \quad (2)$$

где a – средняя аномалия силы тяжести в районе провала;

b – коэффициент зависимости аномалий силы тяжести от высоты.

Для определения вертикального градиента силы тяготения формула (2) преобразована к следующему виду

$$g_i = \gamma_i - (0,3086 - b)h_i + a, \quad (3)$$

или

$$g_i = \gamma_i - (0,3086 - b)h_i + a, \quad (4)$$

где g_i и γ_i – действительное и нормальное значение силы тяжести в i -ой точке.

Обозначим выражение в круглых скобках в формуле (4) через

$$(0,3086 - b) = V_{zz}, \quad (5)$$

где V_{zz} – выражает зависимости силы тяготения от высоты на физической поверхности Земли и является вертикальным градиентом силы тяготения, обусловленной аномальной массой внутри вмещающих пород над выработанным пространством.

Для вычисления вертикального градиента по формулам (2)-(5) использованы результаты нивелироно-гравиметрических измерений в районе Таштагольского месторождения вдоль контура провала на горе Бланже в 2020 году, фотография которого приведена на рис. 1.

В табл. 1 приведены результаты измерения силы тяжести g и высот H , выполненные в районе провала на горе Буланже в 2020 году, а также результаты вычисления аномалий силы тяжести с редукцией в свободном воздухе $\Delta g_{св.в.}$.

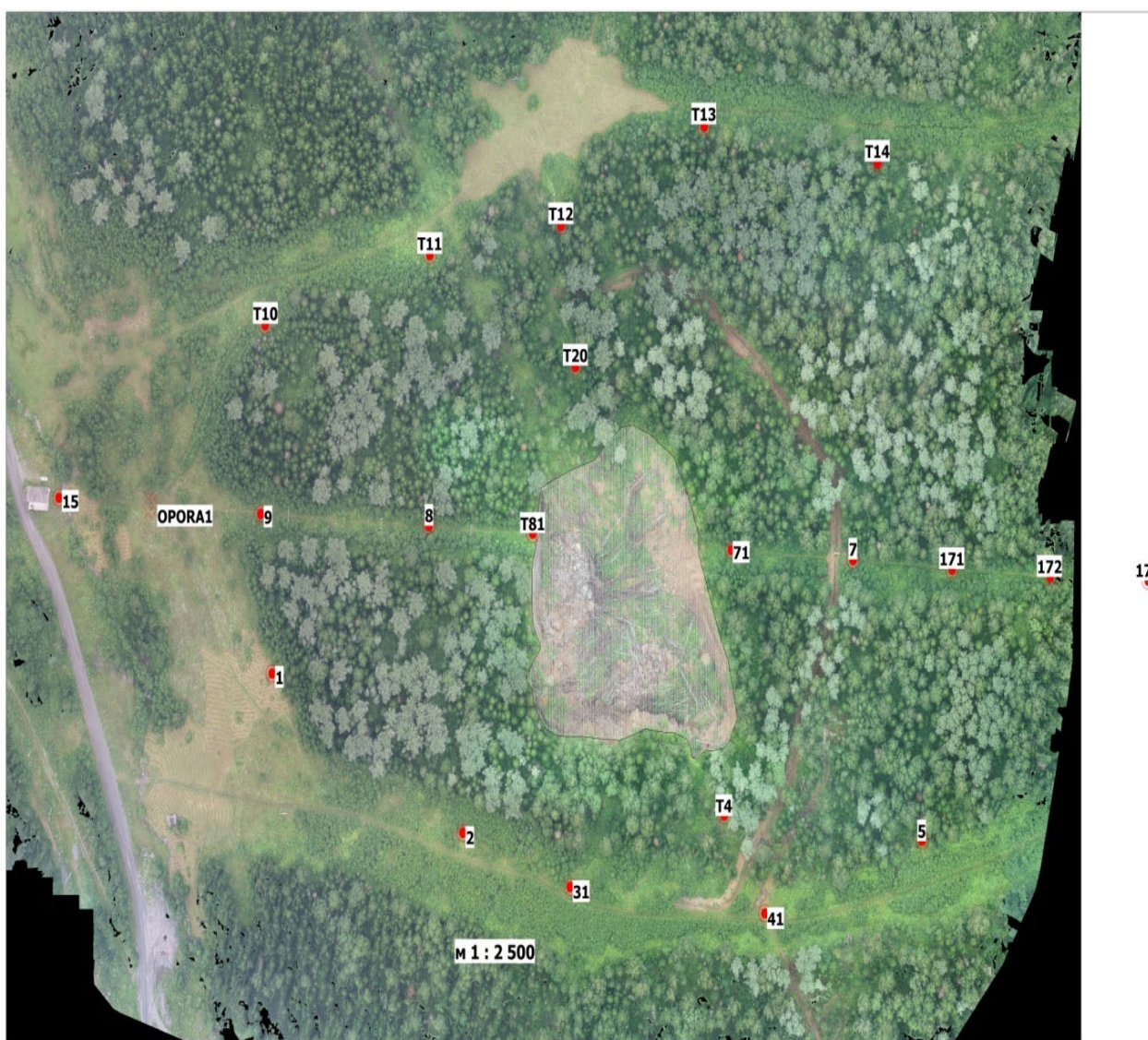


Рис.1. Карта-схема расположения пунктов гравиметрической сети и сети технического нивелирования

Таблица 1

Результаты измерения силы тяжести g и аномалий силы тяжести с редукцией в свободном воздухе $\Delta g_{св.в.}$.

Номер	X	Y	H	g	$\Delta g_{св.в.}$
P1	561923,2	5845131	588,9922	981096,6	-31,0733
T71	562026,4	5845091	614,7104	981090,8	-28,9245
T81	561907,2	5845097	593,4067	981096,1	-30,2135
T.811	561871,6	5845098	584,6228	981092,1	-36,8924
T.82	561817,4	5845100	568,8132	981094,5	-39,4381
P3	561862,8	5845226	577,2176	981092,8	-38,5296
T.711	562051,2	5845093	621,6484	981090,4	-27,223
T.42	562024,7	5844983	621,275	981091,1	-26,5691
T.43	562034,7	5844970	622,356	981091,2	-26,1741
T.4	562015,6	5844994	620,0513	981091,1	-26,9526

На рис. 2 приведена картосхема аномалий силы тяжести, а свободном воздухе в районе провала на горе Буланже (оконтурен провал).

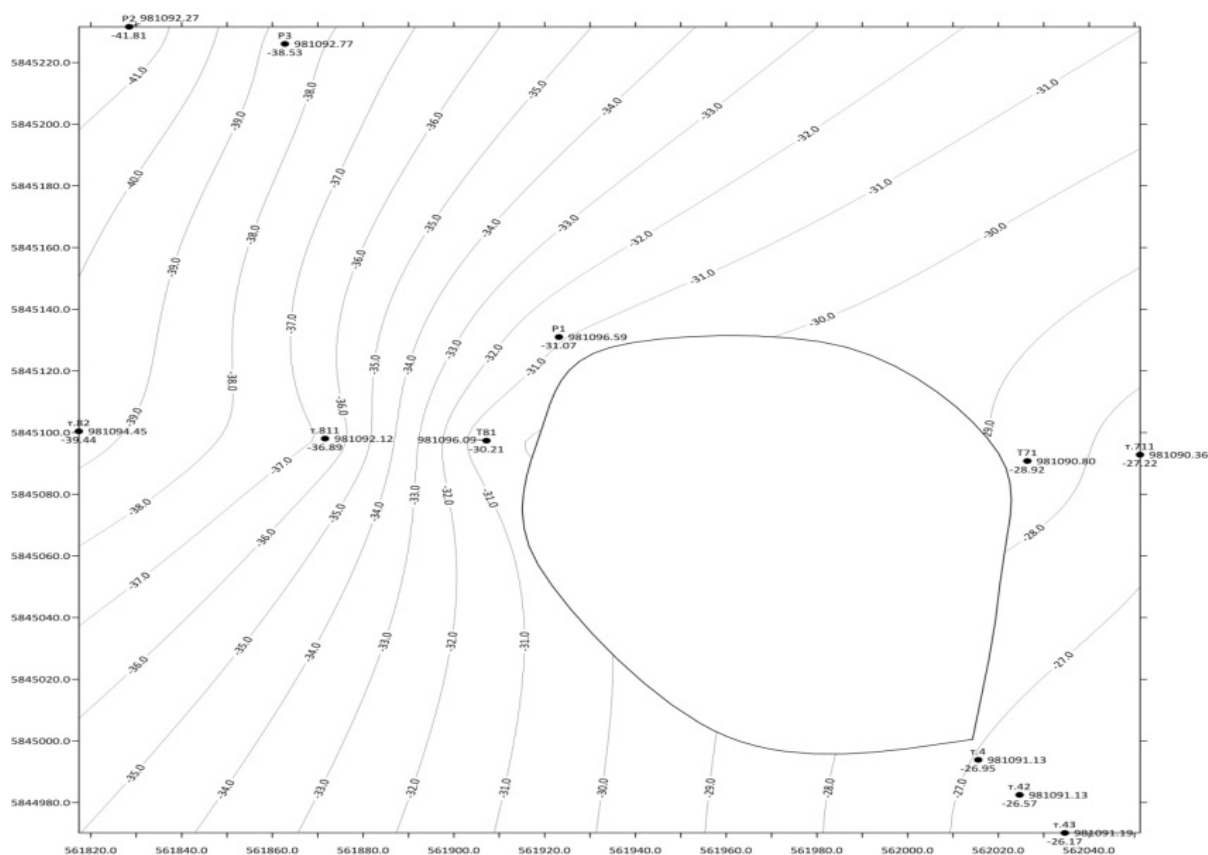


Рис. 2. Карта-схема аномалий силы тяжести в свободном воздухе

**Результаты определения вертикального градиента силы тяжести
по аномалиям силы тяжести**

Для определения коэффициентов a и b необходимо построить систему уравнений следующего вида

$$\Delta g_{CB.B.}^i = a + bH_i, \quad (6)$$

где $i=1...3$ порядковые номера пунктов.

Для решения этой системы использован метод наименьших квадратов, на основании которого составлена система нормальных уравнений следующего вида

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n H_i \Delta g_{CB.B.}^i - \sum_{i=1}^n (\Delta g_{CB.B.}^i)^2 - b \sum_{i=1}^n H_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n \Delta g_{CB.B.}^i - a \sum_{i=1}^n H_i - nb = 0 \end{cases} \quad (7)$$

В табл. 2 приведены значения аномалий силы тяжести $\Delta g_{CB.B.}$ и высот H для 3-х гравиметрических пунктов, расположенных вокруг провала на горе Буланже.

Таблица 2

Исходные значения $\Delta g_{CB.B.}$ и H – аномалий силы тяжести и высот на 3х гравиметрических пунктах (2020 г)

	T71	T81	T4
H	614,71	593,41	620,05
$\Delta g_{CB.B.}$	-28,92	-30,21	-26,95

В табл. 3 приведены вспомогательные вычисления.

Таблица 3

Вспомогательные вычисления

	H^i	$\Delta g_{CB.B.}^i$	$H^i \Delta g_{CB.B.}^i$	$(H^i)^2$	$(\Delta g_{CB.B.}^i)^2$
T71	614,71	-28,92	-17777,4132	377868,3841	836,3664
T81	593,41	-30,21	-17926,9161	352135,4281	912,6441
T4	620,05	-26,95	-16710,3475	384462,0025	726,3025
$\Sigma\Sigma$	1828,1	-86,08	-52414,676	1114465,814	2475,313

Используя данные таблицы 3, можно вычислить коэффициенты уравнения связи a и b .

Коэффициент b определяется с помощью следующего выражения

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n \Delta g^i_{CB.B.} - n \sum_{i=1}^n H_i \Delta g^i_{CB.B.}}{\left(\sum_{i=1}^n H_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n H_i^2} = 0,1047. \quad (8)$$

В этом случае вертикальный градиент составил

$$V_{zz} = (0,3086 - b) = 0,2039 \text{ мГал / м.}$$

Коэффициент a называется свободным членом уравнения (6) и характеризует среднюю аномалию на исследуемом участке

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i \Delta g^i_{CB.B.} - \sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n \Delta g^i_{CB.B.}}{\left(\sum_{i=1}^n H_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n H_i^2} = -92,52. \quad (9)$$

Стоит заметить, что полученное по формуле (9) значение коэффициента $a = -92,52$ мГал можно истолковать как среднюю на участке аномалию в неполной топографической редукции, а коэффициент $b = 0,1047$ как коэффициент редукции Буге – $b = 0,0419\sigma$, который, с плотностью $\sigma = 2,5 \text{ г/см}^3$, равен $b = 0,10475$.

В результате уравнение зависимости силы тяжести от высоты будет иметь следующий вид

$$\widehat{\Delta g_{CB.B.}} = 0,1047 H^i - 92,52. \quad (10)$$

В табл. 4 приведены значения аномалий силы тяжести $\Delta g_{CB.B.}$ и высот H в 3-х гравиметрических пунктах, расположенных вокруг провала. Эти значения аномалий силы тяжести $\Delta g_{CB.B.}$ и высот H получены в результате измерений в октябре 2019 года.

Таблица 4

Исходные значения $\Delta g_{CB.B.}$ и H – аномалий силы тяжести и высот на 3-х гравиметрических пунктах (2019 г)

	Т71	Т81	Т4
H	614,88	593,47	619,88
$\Delta g_{CB.B.}$	-28,42	-30,24	-27,38

По данным табл. 4 составляем таблицу для вспомогательных вычислений (табл. 5).

Таблица 5

Вспомогательные вычисления

	H^i	$\Delta g_{CB.B}^i$	$H^i \Delta g_{CB.B}^i$	$(H^i)^2$	$(\Delta g_{CB.B}^i)^2$
T71	614.88	-28.42	-17474.8896	378077.4144	807.6964
T81	593.47	-30.24	-17946.5328	352206.6409	914.4576
T4	619.88	-27.38	-16972.3144	384251.2144	749.6644
Σ	1828.23	-86.04	-52393.7368	1114535.2697	2471.8184

Используя данные табл. 5 вспомогательных вычислений, вычисляют коэффициенты уравнения связи a и b .

Коэффициент b определяется с помощью следующего выражения

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n \Delta g_{CB.B}^i - n \sum_{i=1}^n H_i \Delta g_{CB.B}^i}{\left(\sum_{i=1}^n H_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n H_i^2} = 0,1014. \quad (11)$$

В этом случае вертикальный градиент составил

$$V_{zz} = (0,3086 - b) = 0,2072 \text{ мГал / м.}$$

Коэффициент a называется свободным членом уравнения (7) и характеризует среднюю аномалию на исследуемом участке

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i \Delta g_{CB.B}^i - \sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n \Delta g_{CB.B}^i}{\left(\sum_{i=1}^n H_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n H_i^2} = -90,4525. \quad (12)$$

В результате уравнение зависимости силы тяжести от высоты будет иметь следующий вид

$$\widehat{\Delta g_{CB.B}} = 0,1047 H^i - 90,4525. \quad (13)$$

Коэффициент $a = -90,4525$ также истолковывается как средняя на участке провала аномалия в неполной топографической редукции, а коэффициент $b = 0,1014$ равен коэффициенту редукции Буге $b = 0,0419\sigma$ с плотностью $\sigma = 2,42 \text{ г/см}^3$.

Заключение

Обобщая приведенные результаты можно сделать следующие выводы:

– на полевых материалах 2019 и 2020 годов разработана и испытана методика определения вертикального градиента силы тяготения аномальной массы в толще пород над выработанным пространством под провалом на горе Буланже, в которой используется зависимость аномалий силы тяжести от высоты;

– в результате обработки нивелирно-гравиметрических ходов в 2019 и 2020 годах по периметру провала на горе Буланже среднее значение вертикального градиента составило 0,2056 мГал/м, а среднее значение вертикального градиента, полученное в результате измерений 2019 года по этому профилю с помощью гравиметра CG-5, составило 0,2142 мГал/м, что на 0,0086 мГал/м больше вычисленного по аномалиям силы тяжести; т.е. разница составляет всего 4,01 %.

– полученный вертикальный градиент силы тяготения может быть использован для аналитического продолжения вертикального градиента силы тяжести с целью определения предварительных параметров аномального тела, расположенного в толще вмещающих пород в виде однородного шара.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов, Ю. В. Карта вертикального градиента силы тяжести центральной части Воронежского массива // Геофизика. – 2006. – № 3. – С. 53–56.
2. Антонов, Ю. В. Плотностные неоднородности в земной коре // Геофизика. – 2005. – № 1. – С. 62–68.
3. Балавадзе, Б. К. К методике определения вертикального градиента силы тяжести // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1968. – Вып. 27. – С. 54–56.
4. Бычков, С. Г. Особенности обработки результатов современной гравиметрической съемки // Геофизический вестник. – 2005. – № 12. – С. 9–13.
5. Веселов, К. Е. Кварцевые астазированные гравиметры: учебное пособие. М.: Гостоптехиздат, 1961. – 176с.
6. Маловичко, А. К. Гравиразведка: учебное пособие. М.: Недра, 1992. – 357 с.
7. Миронов, В. С. Курс гравиразведки: учебное пособие. Л.: Недра, 1972. – 512с.
8. Нумеров, Б. В. Зависимость между местными аномалиями силы тяжести и производными от потенциала // Доклады Академии наук СССР. – 1929. – С. 101–105.
9. Серкерев, С. А. Спектральный анализ гравитационных и магнитных аномалий. М.: Недра, 2002. – 437 с.
10. Шимбирев, Б. П. Теория фигуры Земли: учебное пособие. М.: Недра, 1975. – 432 с.
11. Ager, C. A. Vertical Gravity Gradient Surveys: Field Results and Interpretation in British Columbia, Canada // Geophysics. – 1982. – V. 47. – № 7. – PP. 919-915.
12. Thyssen St. Uber die Moglichkeit den verticalen Schweregradienten mit dem Gravimeter zu messen Beitrag Z. // Geophysics. – 1944. – V.11. – №2. – PP. 36– 68.

© И. А. Инжеватов, 2021