



СПОСОБ ВЫЧИСЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО КВАЗИГЕОИДА

А. П. Федянин

Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

Описывается способ вычисления аномалий силы тяжести относительно квазигеоида. Приводятся формулы редуцирования значений нормального поля силы тяжести с поверхности эллипсоида на поверхность квазигеоида; вычисления условной плотности пород промежуточного слоя и аномалий силы тяжести относительно квазигеоида. Приведен пример сравнения аномалий Буге и аномалий относительно квазигеоида, показывающий преимущества последних для геологической интерпретации данных гравиразведки.

Ключевые слова: аномалии силы тяжести, поверхность эллипсоида, поверхность квазигеоида, промежуточный слой, переменная плотность пород промежуточного слоя.

METHOD FOR CALCULATING GRAVITY ANOMALIES RELATIVE TO A QUASIGEOID

A. P. Fedyanin

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

A method for calculating gravity anomalies relative to a quasigeoid is described. The following formulas are given: reduction of values of the normal gravity from the ellipsoid surface to the quasigeoid surface; calculation of the conditional density of rocks of the Bouguer plate; calculation of gravity anomalies relative to the quasigeoid. An example of comparison of the Bouguer gravities and anomalies relative to a quasi-geoid is given; it shows the advantages of the latter for the geological interpretation of gravity survey data.

Keywords: gravity anomalies, ellipsoid surface, quasigeoid surface, Bouguer plate, conditional density of rocks of the Bouguer plate.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-1-69-72

Традиционно вся практика интерпретации данных гравиразведки при поиске полезных ископаемых основана на анализе аномалий Буге. Одной из проблем интерпретации является получение аномалий силы тяжести на поверхности Земли. Это так называемая проблема промежуточного слоя. Термин «промежуточный слой» автоматически привнесен в гравиразведку из геодезической гравиметрии. В смысловом выражении он представляет слой пород между поверхностью Земли и поверхностью теоретической модели в виде уровенного эллипсоида вращения.

В истории развития метода гравиразведки специалистами постоянно велась дискуссия о том, с какой плотностью учитывать влияние пород промежуточного слоя – постоянной или переменной. Гравиразведчики в основном придерживались мнения, что поправки за влияние промежуточного слоя следует вычислять с постоянной плотностью [1, 2]. В этом случае аномалии Буге относятся к физической поверхности Земли, если соответствующие редукции за промежуточный слой вводятся по геодезическим высотам.

Но по теории определения высот геодезическая высота состоит из двух частей: гипсометрической, изображаемой на топографических картах, и плавной остаточной геoidalной [5]. На практике же при вычислении аномалий Буге редукция проводится только по гипсометрической части высоты.

Поэтому предположение гравиразведчиков о том, что аномалии Буге относятся к физической поверхности Земли, было ложным. В 1940-х гг. геодезисты России в рамках теории фигуры Земли разработали и внедрили в производство новую, так называемую нормальную систему высот [6], в которой гипсометрическая часть высоты (h_n), отсчитываясь от поверхности квазигеоида, стала называться нормальной высотой.

Расстояние же по нормали между поверхностью квазигеоида и поверхностью эллипсоида вращения Земли обозначили как высоту квазигеоида.

Параметром вычисления редукции Буге стало значение нормальной высоты. Очевидно, что и в этом случае аномалии Буге, как и ранее, искажены гравитационным влиянием слоя пород между эллипсоидом и квазигеоидом.

Задача настоящей статьи состоит в том, чтобы вычислить аномалии силы тяжести, не искаженные влиянием высот квазигеоида и структурными объектами промежуточного слоя.

Однако оговоримся, что промежуточным слоем будем считать слой пород переменной плотности от поверхности квазигеоида до поверхности земли.

Мой многолетний опыт внедрения высокоточной гравиразведки в практику нефтегазопромысловых работ в районах Западной и Восточной Сибири показал следующее.

1. Основные публикации в научных журналах о проблеме «прямых поисков» залежей нефти и газа гравиметрическим методом посвящены моделированию геологического разреза по аномалиям Буге. Публикации же об определении плотности пород по латерали в промежуточном слое и в слоях ниже поверхности квазигеоида мне не встречались.

2. Широко известны работы сибирских ученых-геодезистов по анализу точностных характеристик глобальных моделей квазигеоида [3]. Но они имеют опосредованное отношение к задачам, решаемым в настоящей статье, что также мной учитывалось.

3. В. Л. Пантелеев в курсе лекций «Теория фигуры Земли» (МГУ, 2020 г.) отмечает, что редукция (перенос) силы тяжести или потенциала выполняется в линейном приближении.

На локальных участках детальной гравиметрической съемки (<2500 км²) уровенную поверхность квазигеоида можно считать практически параллельной поверхности земного эллипсоида. В связи с этим для переноса значений нормального поля с эллипсоида на квазигеоид я в частном случае применил следующую эмпирическую формулу приближения:

$$g_{кр} = g_э + (0,3086 - f_э)h_{ср},$$

где $g_э$ – значение нормального поля силы тяжести на поверхности эллипсоида; 0,3086 – значение нормального градиента силы тяжести земли, мГал; $f_э$ – среднее значение градиента силы тяжести на изучаемой площади, вычисленное по измерениям $(g_n - g_э)/h_n$; $h_{ср}$ – среднее значение нормальной высоты, вычисленное по измеренным значениям h_n на изучаемой площади; $g_{кр}$ – значения нормального поля силы тяжести на поверхности квазигеоида.

Для вычисления переменной плотности пород промежуточного слоя по гравиметрическим данным найдена следующая эмпирическая формула:

$$p_{ysl} = (0,3086 + ((g_n - g_{кр})/h_n k_{пр}))/0,3086/0,0838, (1)$$

где $k_{пр}$ – коэффициент редукции аномалий Прея (0,3086–0,0838р).

В результате по аналогии с формулой вычисления аномалий Буге запишем формулу вычисления аномалии силы тяжести относительно поверхности квазигеоида:

$$\Delta g_{кр} = (g_n - g_{кр}) + (0,3086 - 0,0419p_{ysl})h_n, (2)$$

где $\Delta g_{кр}$ – аномалия силы тяжести относительно квазигеоида; p_{ysl} – условная плотность пород слоя между поверхностью земли и поверхностью квазигеоида.

В итоге сравним графики аномалий Буге, вычисленных традиционно, и аномалий $\Delta g_{кр}$, определенных по формуле (2), по одному из профилей гравиметрической съемки Бахтинского мегавыступа

м-ба 1:50 000, Графики построены с помощью программы «Мастер диаграмм» (рис. 1).

Разница между аномалиями Буге и $\Delta g_{кр}$ существенна, что видно на кривой «Буге – $\Delta g_{кр}$ » на рис. 1, и оцифрована шкалой слева. Сопоставление ее с кривой рельефа (h_n) показывает их визуальное соответствие. Такое соответствие можно объяснить влиянием разновысотности пунктов наблюдения и плотностных неоднородностей верхней части геологического разреза. Из этого следует, что аномалии силы тяжести, вычисленные относительно поверхности квазигеоида, лучше очищены от влияния пород промежуточного слоя.

В результате можно сделать вывод, что предлагаемый способ вычисления аномалий силы тяжести открывает новые возможности геологической интерпретации данных гравиразведки. Его иллюстрацией служит диаграмма на рис. 2.

Предварительную геологическую интерпретацию данных гравиразведки можно провести сразу же в процессе их обработки.

На рис. 2 синяя кривая *pus.pr.cloe* показывает характер изменения плотности пород геологического разреза относительно поверхности Земли. Значения этой плотности, рассчитанные по формуле (2), использованы мной в качестве первого приближения переменной плотности промежуточного слоя.

Аномалии силы тяжести, полученные после введения поправки за промежуточный слой с переменной плотностью, позволяют подобрать фиктивный плоский слой ниже поверхности квазигеоида. Фиктивный плоский слой – это своего рода гравитационный эквивалент пород геологического разреза ниже поверхности квазигеоида. Градиенты силы тяжести (плотности) данного слоя в пунктах наблюдения вычисляются из условия равенства нормальному градиенту их среднего значения по всей площади или для отдельного профиля съемки.

Красная кривая *p.fik.cloe* характеризует изменение плотности пород части геологического разреза, находящейся ниже поверхности квазигеоида.

Желтая кривая *pus.pr.cl. – p.fik.cl.* показывает характер изменения плотности пород в промежуточном слое, что фиксируется шкалой вспомогательной оси справа.

В чем геологическая суть приведенных кривых? Как отмечено в работе [4], «в пределах Бахтинского мегавыступа и его западного склона бурением и сейсморазведкой выявлена Тынepская зона некомпенсации в тойонское – амгинское время осадконакопления, ограниченная с севера, юга и востока одновозрастными рифогенными барьерами. Но в усольское и бельское время в этой зоне накапливались соленосные отложения». Гравиметрический же профиль проходит строго с юга на север в восточной части Бахтинского мегавыступа. Сопостав-

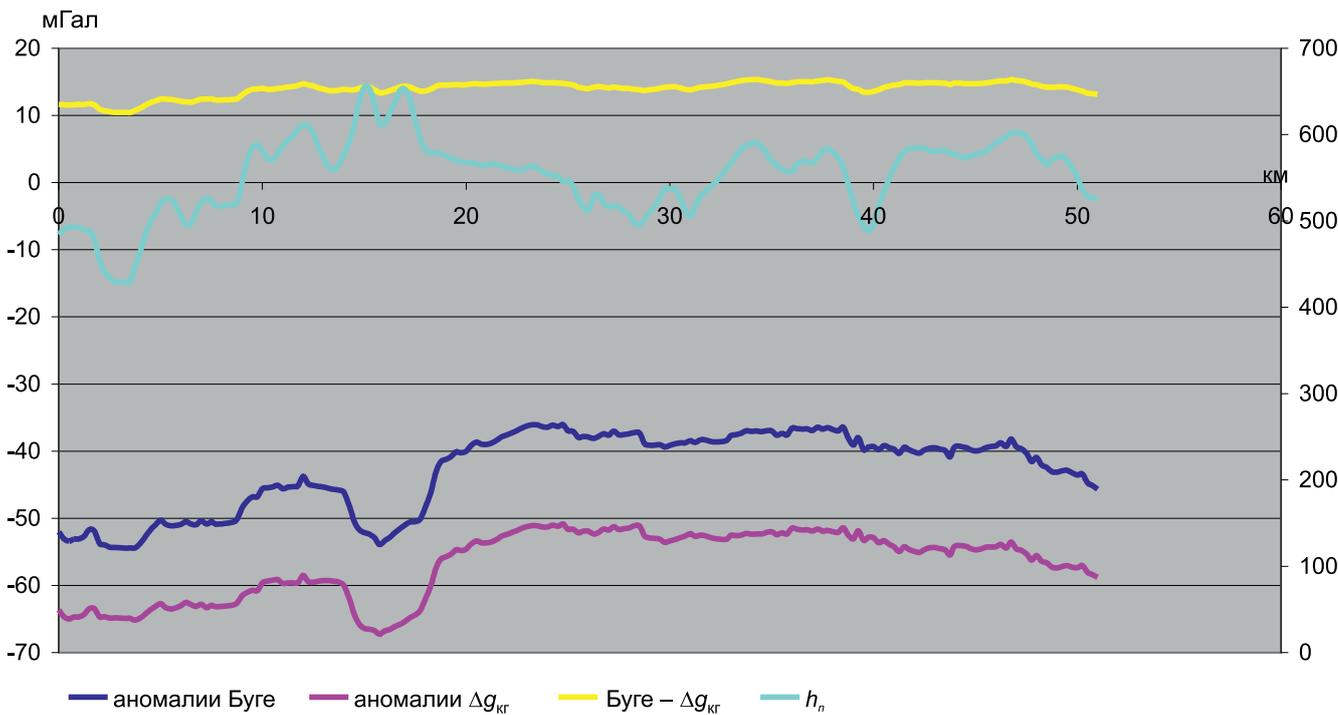


Рис. 1. Рельеф и аномалии силы тяжести по одному из профилей в районе Бахтинского мегавыступа

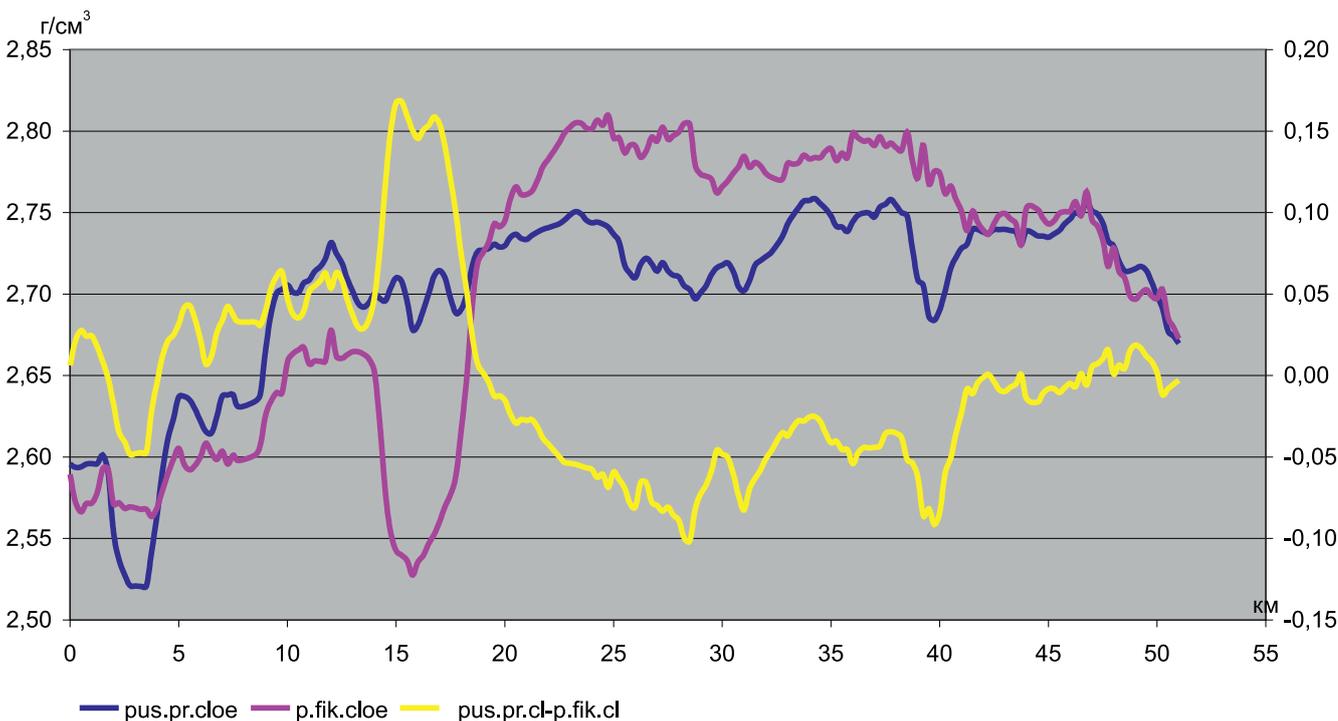


Рис. 2. Изменение плотности пород геологического разреза по одному из профилей в районе Бахтинского мегавыступа

ление плотностных кривых на профиле показывает следующее.

1. В зоне глубинного разлома (0–17 км) на плотностной кривой от пород квазигеоида значения плотности ниже среднего значения, принятого в этом районе, в то время как на кривой от промежуточного слоя картина обратная: повышенные значения плотности совпадают с положением останца тектонического покрова на поверхности Земли.

2. На север от разлома также наблюдается обратная картина плотностных кривых. Значения

плотностной кривой от пород квазигеоида существенно превосходят значение средней плотности осадочных пород. Такое положение отмечается до конца профиля и, вероятно, совпадает с распространением мощных пластовых траппов в нижне-среднекембрийских отложениях. Изменения плотностной кривой от промежуточного слоя в этой части профиля выражены отрицательными значениями. Возможно, это связано с распространением соленосных отложений в усольской и бельской свитах.



В заключение следует также отметить, что повышенные значения плотностных кривых на профиле коррелируют с размещением поверхностных интрузий траппов, показанных на геологической карте этого района м-ба 1:200 000. Геологам, вероятно, будет интересно проанализировать это более детально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андреев Б. А., Клушин И. Г.** Геологическое истолкование гравитационных аномалий. – Л.: Недра, 1965. – 496 с.

2. **Каленицкий А. И.** Технология прикладной высокоточной гравиметрии: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук в форме научного доклада. – Новосибирск, 1994. – 74 с.

3. **Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н.** Моделирование высот квазигеоида на локальных участках земной поверхности по результатам разложения в обобщенный ряд Фурье // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28, № 4 (111). – С. 82–94.

4. **Нижне-среднекембрийский** рифогенный барьер на севере Сибирской платформы – объект первоочередных нефтегазопроисковых работ / Ю. А. Филиппов, Н. В. Мельников, А. С. Ефимов и др. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 2 (18). – С. 25–35.

5. **Пеллинен Л. П.** Высшая геодезия. – М.: Недра, 1978. – 264 с.

6. **Шимбирев Б. П.** Теория фигуры Земли. – М.: Недра, 1975. – 432 с.

REFERENCES

1. Andreev B.A., Klushin I.G. *Geologicheskoe is-tolkovanie gravitatsionnykh anomalii* [Geological interpretation of gravity anomalies]. Leningrad, Nedra Publ., 1965. P. 495. (In Russ.).

2. Kalenitskiy A.I. *Tekhnologiya prikladnoy vysokotochnoy gravimetrii. Dokt. dis.* [Technology of applied high-precision gravity survey. DSc thesis]. Novosibirsk, 1994. 74 p. (In Russ.).

3. Kanushin, V.F., Ganagina, I.G., Goldobin, D.N. [Modeling the Quasigeoid Heights on Local Areas of the Earth Surface by the Results of Expansion into a Generalized Fourier Series]. *Гироскопия и навигация*, 2020, vol. 28, no. 4 (111), pp. 82–94. (In Russ.).

4. Filiptsov Yu.A., Melnikov N.V., Efimov A.S., et al. [Lower-Middle Cambrian reef barrier in the northern Siberian Platform as a target of primary exploration for oil and gas]. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири – Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2014, no. 2 (18), pp. 20–35. (In Russ.).

5. Pellinen L.P. *Vysshaya geodeziya* [Higher Geodesy]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 264 p. (In Russ.).

6. Shimbirev L.P. *Teoriya figury Zemli* [Theory of the Earth's Figure]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 432 p. (In Russ.).

© А. П. Федянин, 2022