

# Сравнение гравиметрических аномалий для заселенных и незаселенных территорий (на примере Большого Урала)

А.В. Мартыненко  
amartynenko@rambler.ru

Уральский государственный университет путей сообщения (Екатеринбург)  
Институт экономики УрО РАН (Екатеринбург)

## Аннотация

В работе исследуется вопрос о зависимости между гравиметрическими аномалиями и расположением городов. Сравниваются значения гравиметрических аномалий в свободном воздухе, Буге и изостатической для заселенной и незаселенной территорий. Показано, что для этих двух видов территорий гравиметрические аномалии различаются. В частности, установлено, что заселенные территории характеризуются, в среднем, большими, чем незаселенные территории, значениями гравиметрических аномалий.

**Ключевые слова:** гравиметрическая аномалия; заселенная территория; расположение городов; геоинформационная система.

## 1 Введение

Возникновение и развитие городов происходит под влиянием большого количества разнообразных политических, социально-экономических и геофизических факторов. Для многих из них достаточно хорошо изучены механизмы воздействия на размещение и развитие населенных пунктов. В частности, среди геофизических факторов наибольшее (и достаточно очевидное) значение имеют климат, рельеф местности, обеспеченность территории различными природными ресурсами (минеральными, водными, биоресурсами), потенциальные стихийные бедствия и ряд других [1]. Однако, наряду с перечисленными факторами, которые оказывают непосредственное влияние, можно указать и такие факторы, которые оказывают косвенное воздействие, проявляя себя через свое влияние на другие геофизические факторы. К таким косвенным факторам относятся, в частности, гравиметрические аномалии.

Гравиметрической аномалией в точке земной поверхности с координатами  $(x, y)$  называется величина

$$\Delta g(x, y) = g_{obs}(x, y) - g_{teor}(x, y), \quad (1)$$

где  $g_{obs}(x, y)$  – наблюдаемое значение силы тяжести в точке  $(x, y)$ , т.е. значение, полученное в результате непосредственного измерения;  $g_{teor}(x, y)$  – значение силы тяжести в точке  $(x, y)$ , рассчитанное на основании ряда теоретических предположений относительно формы и структуры Земли. Для вычисления  $g_{teor}(x, y)$  исходят из того, что Земля имеет форму эллипсоида вращения. Однако при этом необходимо учитывать,

---

*Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes.*

In: G.A. Timofeeva, A.V. Martynenko (eds.): Proceedings of 3rd Russian Conference "Mathematical Modeling and Information Technologies" (ММИТ 2016), Yekaterinburg, Russia, 16-Nov-2016, published at <http://ceur-ws.org>

что точка земной поверхности, для которой вычисляется теоретическое значение силы тяжести, не лежит на поверхности эллипсоида, а находится выше (для возвышенностей) или ниже (для впадин). Кроме того, для точек, расположенных выше (ниже) поверхности эллипсоида, необходимо учитывать наличие (отсутствие) промежуточного слоя между поверхностью эллипсоида и поверхностью Земли. Если исходить из того, что плотность вещества эллипсоида однородна и учитывать только расстояние от точки наблюдения до поверхности эллипсоида, то аномалия, вычисленная по формуле (1) называется аномалией в свободном воздухе. Если дополнительно учитывается промежуточный слой, то аномалия, вычисленная по формуле (1) называется аномалией Буге. Также можно отказаться от предположения об однородности эллипсоида и исходить из, так называемого, закона изостатического равновесия, который заключается в предположении, что менее плотная земная кора плавает в более плотном слое мантии в соответствии с законом Архимеда. Аномалия, вычисленная по формуле (1) в этом случае называется изостатической аномалией. Более подробные сведения о вычислении различных аномалий можно найти, например, в [2].

Гравиметрические аномалии являются источником ценной информации о внутреннем строении Земли и активно используются в различных областях геофизики. Например, в геодезии гравиметрические аномалии используют для определения и уточнения моделей геоида. Также их используют в геологоразведке (гравиоразведке) для поиска месторождений полезных ископаемых [2].

В статьях [3]–[7], а также в монографии [8] исследуется воздействие гравиметрических аномалий на структуру расселения и хозяйственную деятельность человека. В этих статьях выдвигается и последовательно применяется гипотеза о том, что поселения тяготеют к территориям, которые четко выделяются в гравиполях. В частности, многие особенности, связанные с возникновением и развитием ряда городов Урала и Западной Сибири авторы перечисленных работ объясняют влиянием гравиметрических аномалий.

Основная цель данной работы – выявить статистически значимые особенности значений гравиметрических аномалий для территорий, на которых располагаются населенные пункты, для чего будет выполнено сравнение статистических характеристик гравиметрических аномалий территорий городов с аналогичными характеристиками для незаселенных территорий.

## 2 Исходные данные

Для изучения статистических свойств гравиметрических аномалий в работе используются данные Международного Гравиметрического Бюро (International Gravimetric Bureau) [9]. В частности, мы будем анализировать гравиметрические аномалии в свободном воздухе, Буге и изостатические, а также топографические данные (высоты над уровнем моря) для участка земной поверхности от  $50^\circ$  с.ш. до  $67^\circ$  с.ш. и от  $53^\circ$  в.д. до  $77^\circ$  в.д. (рис. 1). Этот участок охватывает наиболее заселенные территории Большого Урала и небольшую часть Западной Сибири и Северного Казахстана. Всюду далее будем обозначать этот участок через  $D$ . Значения аномалий и высоты над уровнем моря в базе данных Международного Гравиметрического Бюро даны для сетки с шагом  $2'$ , т.е. рассматриваемой территории соответствует около 500 тыс. значений каждой из аномалий. Для каждой точки  $(x, y) \in D$  обозначим через  $f = f(x, y)$ ,  $b = b(x, y)$ ,  $i = i(x, y)$ ,  $t = t(x, y)$  значения аномалий в свободном воздухе, Буге, изостатической и высот над уровнем моря, соответственно. В качестве примера на рис. 1 представлены изолинии аномалий в свободном воздухе (линии уровня функции  $f(x, y)$ ).

Мы будем рассматривать населенные пункты, которые имеют население более 1000 чел. На территории  $D$  находится 463 таких населенных пункта. Для удобства, будем называть их городами, хотя некоторые из них являются поселками и селами. Каждому из городов поставим в соответствие значения функций  $f$ ,  $b$ ,  $i$  и  $t$  в точке, являющейся географическим центром города. Здесь необходимо отметить, что в качестве значений гравиметрических аномалий для города более естественно было бы взять усредненное значение аномалий по всей территории города. Однако, результаты, которые получаются в этом случае не отличаются от случая точечного значения в центре города. Это объясняется тем, что исходные данные уже являются усредненными по прямоугольникам со стороной  $2'$ , а также тем, что значения гравиметрических аномалий практически не имеют резких колебаний. Множества значений функций  $f$ ,  $b$ ,  $i$  и  $t$  по всем городам обозначим через  $F_{town}$ ,  $B_{town}$ ,  $I_{town}$  и  $T_{town}$ , соответственно.

Чтобы рассмотреть значения аномалий для незаселенных территорий необходимо исключить из  $D$  участки, относящиеся к городам. Для этого можно исключить всю территорию города или, даже, территорию города с некоторой окрестностью. Однако, полученные в этом случае результаты не будут отличаться от ситуации, когда из  $D$  удаляются только центры городов. Более того, результаты не изменятся и в том случае, когда в качестве незаселенной территории рассматривается вся область  $D$ . Это связано с тем, что

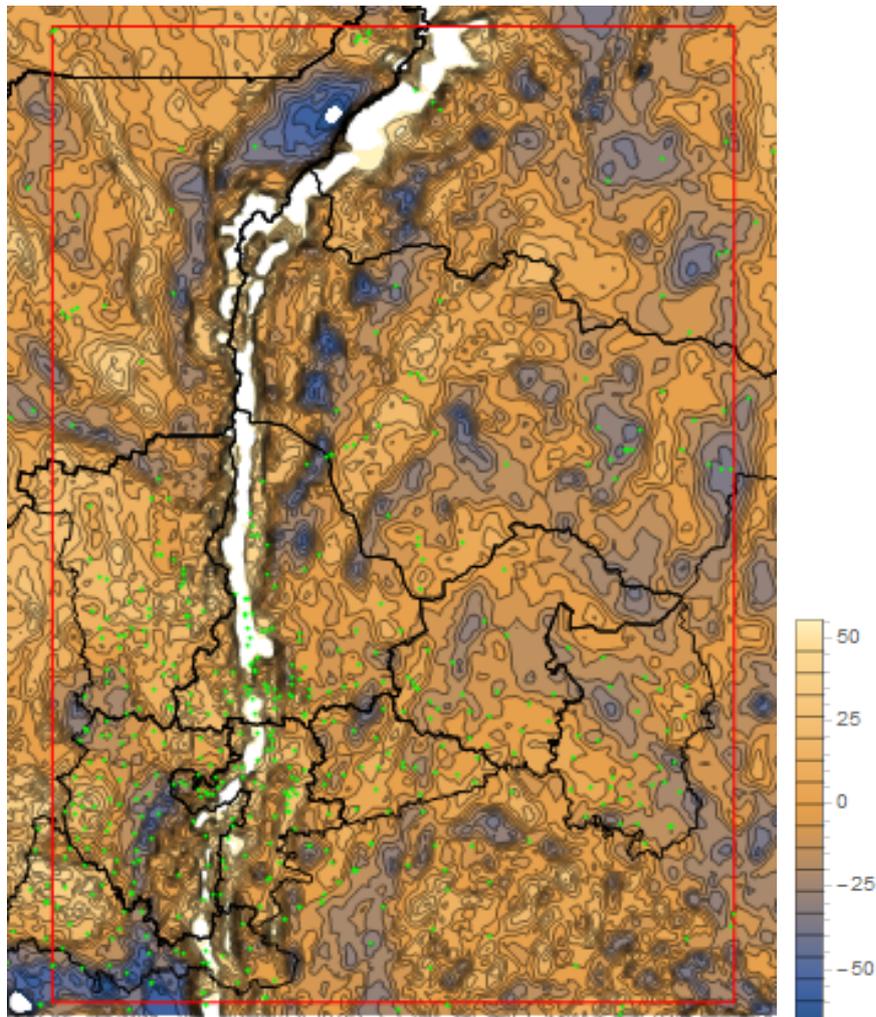


Рис. 1: Изолинейная карта гравиметрических аномалий в свободном воздухе. Область  $D$  выделена красным. Точками показаны населенные пункты с населением более 1 тыс. чел.

количество исключаемых значений даже в случае учета окрестности города не превышает несколько тысяч, что чрезвычайно мало по сравнению со всей областью  $D$ . Поэтому, мы будем рассматривать в качестве незаселенной территории всю область  $D$  и множество значений функций  $f$ ,  $b$ ,  $i$  и  $t$  для всех точек из  $D$  обозначим через  $F$ ,  $B$ ,  $I$  и  $T$ , соответственно.

Информационная и математическая обработка исходных данных будет проводиться в программе Wolfram Mathematica с использованием методологии обработки геоданных, предложенной в [10].

### 3 Сравнение средних значений

Для того чтобы выяснить существуют ли различия для городов и незаселенных территорий будем сравнивать средние значения аномалий. Поступая стандартным образом, выдвинем гипотезы о равенстве средних значений аномалий при альтернативных гипотезах о том, что средние для городов больше, чем средние для незаселенных территорий. Для проверки гипотез будем использовать критерий

$$Z = \frac{\bar{Y} - \bar{X}}{\sqrt{D_B(Y)/n_Y + D_B(X)/n_X}}. \quad (2)$$

Подчеркнем, что для применения данного критерия не требуется того, чтобы генеральные совокупности были распределены нормально. Результаты проверки гипотез а также интервальные оценки для средних

значений представим в виде табл. 1 и 2.

Таблица 1: Сравнение средних значений аномалий для незаселенных территорий и городов

Гипотеза $H_0$	$M(F) = M(F_{town})$	$M(B) = M(B_{town})$	$M(I) = M(I_{town})$	$M(T) = M(T_{town})$
Гипотеза $H_1$	$M(F) < M(F_{town})$	$M(B) < M(B_{town})$	$M(I) < M(I_{town})$	$M(T) \neq M(T_{town})$
Среднее для незаселенной территории	-4.49395	78.8753	-4.31876	156.905
Среднее для городов	0.423148	81.0587	2.88571	171.89
P-значение	$1.0351 \cdot 10^{-6}$	0.00799566	$1.05249 \cdot 10^{-13}$	0.0120596
Вывод при уровне значимости $\alpha = 1\%$	отвергается	отвергается	отвергается	не отвергается

Таблица 2: Доверительные интервалы для средних значений с уровнем доверия 99%

$-4.55798 < M(F) < -4.42992$	$-2.25476 < M(F_{town}) < 3.10106$
$78.7985 < M(B) < 78.9521$	$78.7165 < M(B_{town}) < 83.4008$
$-4.37607 < M(I) < -4.26145$	$0.349082 < M(I_{town}) < 5.42233$
$156.362 < M(T) < 157.448$	$157.131 < M(T_{town}) < 186.649$

Результаты проверки гипотез показывают, что средние значения аномалий для городов превосходят средние значения аномалий для незаселенных территорий, что можно трактовать следующим образом: необходимой предпосылкой роста и развития города является наличие на его территории избыточного вещества (положительное значение гравиметрической аномалии означает, что в рассматриваемом районе имеется избыток вещества, который и обеспечивает положительность аномалии). Здесь необходимо отметить, что из результатов работ [3]–[7] следует, что гравиметрические аномалии, по всей видимости, оказывают влияние только на определенные типы городов. Поэтому рассмотрение совокупности всех городов является достаточно грубым подходом, который слабо учитывает специфику исследуемых зависимостей. В то же время, тот факт, что даже для всей совокупности городов обнаружено статистически значимое влияние гравиметрических аномалий является дополнительным аргументом в пользу того, что аномалии оказывают существенное влияние на процессы расселения. Более детальным исследованиям влияния аномалий на различные типы городов планируется посвятить дальнейшие работы.

Также необходимо подчеркнуть, что для значений высот над уровнем моря, т.е. для выборок  $T$  и  $T_{town}$ , проведенный анализ не выявил значимых различий средних значений. Это, кроме прочего, косвенно свидетельствует о том, что различия, обнаруженные для аномалий в свободном воздухе, Буге и изостатической не являются следствием каких-то структурных свойств анализируемых данных, а отражают влияние гравиметрических аномалий на процессы возникновения и развития городов.

Если сформулированное выше предположение о необходимости избыточного вещества для развития города является верным, то крупные города должны тяготеть к территориям с большими значениями гравиметрических аномалий гораздо сильнее, чем небольшие города. Чтобы в этом убедиться, упорядочим все города лежащие в области  $D$  в порядке убывания населения и возьмем из получившегося списка сто

Таблица 3: Сравнение средних значений аномалий для незаселенных территорий и больших городов

Гипотеза $H_0$	$M(F) = M(F_{bt})$	$M(B) = M(B_{bt})$	$M(I) = M(I_{bt})$	$M(T) = M(T_{bt})$
Гипотеза $H_1$	$M(F) < M(F_{bt})$	$M(B) < M(B_{bt})$	$M(I) < M(I_{bt})$	$M(T) \neq M(T_{bt})$
Среднее для незаселенной территории	-4.49395	78.8753	-4.31876	156.905
Среднее для больших городов	3.80431	83.7803	6.9061	179.043
Р-значение	0.000589368	0.00118201	$2.19979 \cdot 10^{-6}$	0.0318555
Вывод при уровне значимости $\alpha = 1\%$	отвергается	отвергается	отвергается	не отвергается

первых и сто последних городов (большие и малые города, соответственно). Выясним насколько значимо отличаются средние значения аномалий для этих групп городов от аналогичных значений для незаселенных территорий. Для множеств значений гравиметрических аномалий и высот над уровнем моря больших городов будем использовать обозначения  $F_{bt}$ ,  $B_{bt}$ ,  $I_{bt}$  и  $T_{bt}$ . Аналогично, для малых городов –  $F_{st}$ ,  $B_{st}$ ,  $I_{st}$  и  $T_{st}$ .

Результаты сравнения различных групп городов с незаселенными территориями представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 4: Сравнение средних значений аномалий для незаселенных территорий и малых городов

Гипотеза $H_0$	$M(F) = M(F_{st})$	$M(B) = M(B_{st})$	$M(I) = M(I_{st})$	$M(T) = M(T_{st})$
Гипотеза $H_1$	$M(F) \neq M(F_{st})$	$M(B) \neq M(B_{st})$	$M(I) \neq M(I_{st})$	$M(T) \neq M(T_{st})$
Среднее для незаселенной территории	-4.49395	78.8753	-4.31876	156.905
Среднее для малых городов	-5.19599	76.2204	-3.39306	175.644
Р-значение	0.623018	0.899822	0.330821	0.0377685
Вывод при уровне значимости $\alpha = 1\%$	не отвергается	не отвергается	не отвергается	не отвергается

Полученные результаты свидетельствуют о том, что гравиметрические аномалии территорий, на которых расположены города, значимо отличаются от аналогичных аномалий незаселенных территорий: города располагаются на территориях, которые имеют, в среднем, более высокие значения аномалий, т.е. обладают избыточным (по сравнению с незаселенной территорией) веществом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-06-00324.

## Список литературы

- [1] V. P. Maksakovskii. *Obshhaja jekonomicheskaja i social'naja geografija* [General economic and social geography]. Moscow, Vlados, 2009. (in Russian) = В. П. Максаковский. *Общая экономическая и социальная география*. Москва, ВЛАДОС, 2009.
- [2] V. V. Orlenok. *Osnovy geofiziki* [Fundamentals of Geophysics]. Kaliningrad, Kaliningr. gos. un-t, 2000. (in Russian) = В. В. Орлёнок. *Основы геофизики*. Калининград, Калинингр. гос. ун-т, 2000.
- [3] V. V. Litovskii. Gravgeography, infrastructure problems and the distribution of productive forces. *Glubinnoe stroenie, geodinamika, teplovoe pole Zemli, interpretacija geofizicheskikh polej. Shestye nauchnye chtenija pamjati Ju.P. Bulashevicha*, 232–235, Yekaterinburg, 2011. (in Russian) = В. В. Литовский. Гравиогеография, проблемы инфраструктуры и размещения производительных сил. *Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича*, 232–235, Екатеринбург, 2011.
- [4] V. V. Litovskii. Problems of spatial formation of the Urals key transport frame: megaproject "Ural industrial-Ural polar". *Transport of the Urals*, 29(2):21–29, 2011. (in Russian) = В. В. Литовский. Проблемы пространственного формирования опорного транспортного каркаса Урала: мегапроект "Урал промышленный - Урал Полярный". *Транспорт Урала*, 29(2):21–29, 2011.
- [5] V. V. Litovskii. Gravygeography of Urals copper mining towns. Message 1. The north of Sverdlovsk region. *Эко-потенциал*, 16(4):22–32, 2016. (in Russian) = В. В. Литовский. Гравиогеография горнозаводских городов Урала меднорудной специализации. Сообщение 1. Север Свердловской области. *Эко-потенциал*, 16(4):22–32, 2016.
- [6] V. V. Litovskii. Gravygeography of Ural copper mining towns. Message 2. Middle Ural and north of the southern Ural. *Эко-потенциал*, 16(4):33–49, 2016. (in Russian) = В. В. Литовский. Гравиогеография горнозаводских городов Урала меднорудной специализации. Сообщение 2. Средний Урал и север Южного Урала. *Эко-потенциал*, 16(4):33–49, 2016.
- [7] V. V. Litovskii, V. V. Levkovskii. Gravygeography of Ural copper mining towns. Message 3. Republic of Bashkortostan, Orenburg region. *Эко-потенциал*, 16(4):50–64, 2016. (in Russian) = В. В. Литовский, В. В. Левковский. Гравиогеография горнозаводских городов Урала меднорудной специализации. Сообщение 3. Республика Башкортостан, Оренбургская область. *Эко-потенциал*, 16(4):50–64, 2016.
- [8] V. V. Litovskii. *Teoretiko-geograficheskie osnovy formirovanija dominantnogo uralo-arkticheskogo geojekonomicheskogo prostranstva i ego infrastruktury (dlja zadach formirovanija mnogofunkcional'nogo bazisnogo opornogo vnutrennego i kontinental'nogo mosta Rossii po osi "Sever – Jug")* [Theoretical and geographical bases of the formation dominant geo-economic infrastructure of Ural and Arctic space (for the formation of the multifunctional basic internal and continental bridge of Russia on the axis "North-South")]. Moscow, GEOS, 2016. (in Russian) = В. В. Литовский, *Теоретико-географические основы формирования доминантного урало-арктического геоэкономического пространства и его инфраструктуры (для задач формирования многофункционального базисного опорного внутреннего и континентального моста России по оси "Север – Юг")*. Москва, ГЕОС, 2016.
- [9] International Gravimetric Bureau. <http://bgi.obs-mip.fr>.
- [10] A. V. Martynenko. Program Wolfram Mathematica as a universal tool for processing and analysis geographic information. *Географический вестник*, 4(39):129–138, 2016. (in Russian) = А. В. Мартыненко. Программа Wolfram Mathematica как универсальная среда для обработки и анализа географической информации *Географический вестник*, 4(39):129–138, 2016.

# Comparison of gravity anomalies for populated and unpopulated areas (by the example of the Great Ural Region)

*Alexander V. Martynenko*

Ural State University of Railway Transport (Yekaterinburg, Russia)

Institute of Economics, The Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russia)

**Abstract.** We study the dependencies between gravity anomalies and the location of cities. Free-air, Bouguer and isostatic anomalies are compared for populated and unpopulated areas. It was shown that the anomalies are different for these areas. In particular, it was found that the gravity anomalies of populated areas are larger than the gravity anomalies of unpopulated areas.

**Keywords:** gravity anomaly, populated area, location of cities, geographic information system.