

5. Манукян Л.В. Предпосылки внедрения в РА постоянно действующих референц-станций / Л.В.Манукян, А.А.Амирьян // Сборник научных статей ЕГУАС, т. II (46). – Ереван, 2012. – С. 135-139.

Надійшла до редакції

26.04.2013

УДК 528

Э. Паршялюнас,
Р. Бирвидене,
П. Петрошкявичюс,
Ч. Аксамитаускас,
Л. Папшене

АНАЛИЗ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ КВАЗИГЕОИДА

Представлена новая гравиметрическая сеть Литвы, которая дала возможность оценить точность гравиметрической карты масштаба 1:200 000 и выявить ее систематические ошибки. Гравиметрические данные новой сети и на их основе созданная цифровая модель разностей ускорения силы тяжести позволили уточнить исходную информацию для определения квазигеоида.

Ключевые слова: гравиметрическая сеть, квазигеоид.

Постановка проблемы. Геодезические работы выполняются в неоднородном поле силы тяжести Земли. Поэтому при обработке точных геодезических измерений необходима информация о поле силы тяжести. Такую информацию предоставляют гравиметрические измерения. Особое место при решении геодезических задач и определении высот точек земной поверхности занимают эквипотенциальная поверхность поля силы тяжести, принимаемая за геоид, и поверхность квазигеоида. Определив геодезические высоты точек космическим GPS-методом и зная высоты квазигеоида над эллипсоидом, можно получить нормальные высоты, не выполняя нивелирования. Поэтому очень актуально с наибольшей точностью знать поверхность квазигеоида. Хотя для определения квазигеоида можно использовать данные разных геодезических измерений, но при решении этой задачи главное место занимает данные гравиметрических измерений.

При вычислении квазигеоида территории Литвы в 1994 и 1998 гг. основная гравиметрическая информация была получена с гравиметрической карты Буге-аномалий масштаба 1:200 000. Карта составлена по результатам гравиметрической съемки, выполненной в 1954–1962 гг. Буге-аномалии, средняя квадратическая ошибка которых по данным карты не превышает 0,8 мГал, были вычислены, используя силу тяжести Потсдамской гравиметрической системы, координаты 1942 г., нормальные

высоты Балтийской системы, нормальное поле Гельмерта и плотность земной коры $2,3 \text{ г/см}^3$. Для определения квазигеоида использовано около 10 000 точек. Кроме того, использованы гравиметрические данные 103 пунктов третьего класса, которые служили основой для гравиметрической съемки. Указано, что средняя квадратическая ошибка ускорения силы тяжести на этих пунктах не превышает $0,35 \text{ мГал}$. Были также использованы данные 21 гравиметрического пункта второго класса. Ускорение силы тяжести на этих пунктах определено со средней квадратической ошибкой $0,2 \text{ мГал}$. Измерения выполнены в 1968 г. Для определения квазигеоида использованы гравиметрические данные части Куршского залива (771 точка) и прибрежной части Балтийского моря (897 точек). Эти измерения ускорения силы тяжести выполнены в 1968–1974 гг. в Куршском заливе со средней квадратической ошибкой $0,15 \text{ мГал}$, в море – $0,32 \text{ мГал}$.

Для вычислений квазигеоида все гравиметрические данные редуцированы с Потсдамской гравиметрической системы в систему IGSN 71, используя поправку 14 мГал . Координаты гравиметрических пунктов вычислены в новой координатной системе Литвы LKS 94 (совпадающей с Европейской системой ETRS 89), использующей эллипсоид GRS 80. Аномалии силы тяжести были вычислены с применением нормального поля GRS 80 и плотности земной коры $2,67 \text{ г/см}^3$.

Вычисления квазигеоида выполнены в тесном сотрудничестве со специалистами рабочей группы по определению геоида Геодезической комиссии Северных стран (NKG), используя гравиметрические и геодезические данные не только территории Литвы, но и всего региона Балтийского моря, а также модели геопотенциала, которые имелись в базе данных рабочей группы. Как показали исследования [1; 2] высоты квазигеоида были определены с точностью до нескольких сантиметров.

Для повышения точности высот квазигеоида были необходимы новые гравиметрические измерения.

Анализ последних исследований. Созданием новой гравиметрической сети Литвы занялся Институт геодезии Вильнюсского технического университета имени Гедиминаса. Работы выполнялись по заказу Земельной службы Литвы. Создание сети началось с абсолютных измерений силы тяжести. Эти измерения в 1994 и 2002 годах выполнил научный сотрудник Финского геодезического института Jaakko Mäkinen баллистическим гравиметром *JLLAg-5* [3]. Измерения были произведены на трех пунктах, которые находятся в городах Вильнюс, Клайпеда и Паневежис. Ускорение силы тяжести определено со средней квадратической ошибкой 5 мкГал . Результаты этих измерений и стали основой гравиметрической системы Литвы LSS07. Для распространения этой системы на всю территорию страны в 1998–2001 гг. была создана гравиметрическая сеть первого класса [4; 5], объединяющая 51 пункт. Измерения выполнены в сотрудничестве с институтом Геодезии и картографии Польши. Измерения выполнялись тремя–шестью гравиметрами LaCoste & Romberg, принадлежащими институту Польши и NGA (NIMA). Калибровка гравиметров производилась на гравиметрических базах Вильнюс – Паневежис и Борова Гора – Гданск. Дальнейшим этапом сгущения гравиметрической сети стало создание сети второго класса [6; 7]. Измерения на пунктах этой сети произведены в 2007–2009 гг. четырьмя гравиметрами Scintrex CG-5. Теперь гравиметрическая сеть Литвы объединяет 686 пунктов (рис. 1).

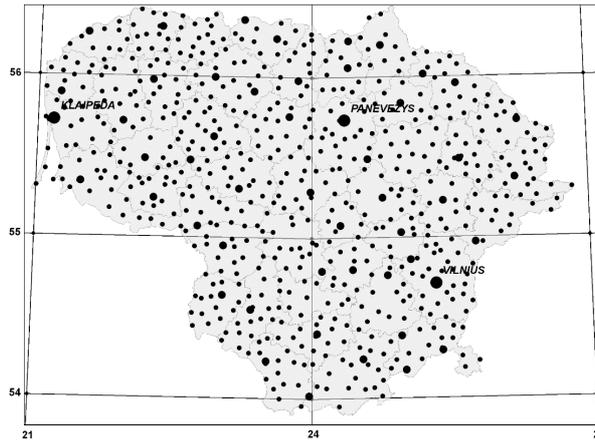


Рис. 1. Пункты гравиметрической сети

После уравнивания сети выяснилось, что средняя квадратическая ошибка урвненных значений ускорения силы тяжести не превышает 3 мкГал.

Цель статьи и постановка задачи. С созданием новой гравиметрической сети появилась свежая информация о поле силы тяжести территории Литвы и возможность уточнить поверхность квазигеоида. Появилась также возможность оценить точность ускорения силы тяжести, получаемой по гравиметрической карте, которая содержит основную информацию о поле силы тяжести территории Литвы при определении квазигеоида. Результаты этих исследований и предоставлены в этой статье.

Изложение основного материала. Для оценки точности значений силы тяжести получаемых по гравиметрической карте, эти значения были вычислены в пунктах гравиметрической сети. Сначала были вычислены координаты гравиметрических пунктов в системе 1942 года. Значения аномалий Буге в пунктах гравиметрической сети определялись интерполированием. Ускорения силы тяжести на поверхности земли в Потсдамской системе g_{Pz} по аномалиям Буге $(g_{Pz} - \gamma_H)_\delta$ вычислялись с использованием формулы:

$$g_{Pz} = (g_{Pz} - \gamma_H)_\delta + \gamma_H^0 + 0,0419\delta H_{Bz} - 0,3086 H_{Bz}, \quad (1)$$

где γ_H^0 – ускорение силы тяжести в нормальном поле Гельмерта на поверхности эквипотенциального эллипсоида;

$$\gamma_H^0 = 978030 (1 + 0,005302 \sin^2 B_{42} - 0,000007 \sin^2 2B_{42}); \quad (2)$$

B_{42} – геодезическая широта 1942 г.; $\delta = 2,30$ г/см³ – плотность пород промежуточного слоя; H_{Bz} – нормальная высота поверхности Земли в Балтийской системе.

Редуцирование значения ускорения силы тяжести с поверхности земли на высоту H_B гравиметрического пункта выполнялось по формуле

$$g_P = g_{Pz} + dg \quad . \quad (3)$$

Если $H_{Bz} > H_B$, то

$$dg = \Delta\gamma_H(h) - 2 \cdot 0,0419 \delta h, \quad (4)$$

где $\Delta\gamma_H(h)$ – поправка за высоту в нормальном поле Гельмерта,

$$\Delta\gamma_H(h) = 0,30855 (1 + 0,00071 \cos 2B_{42})h - 0,0723h^2 \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

$$h = H_{Bz} - H_B.$$

Если $H_{Bz} < H_B$, то

$$dg = -\Delta\gamma_H(h), \quad (6)$$

где $h = H_B - H_{Bz}$.

Вычислены разности между значениями ускорения силы тяжести, полученными по гравиметрической карте и определенные измерениями в гравиметрических пунктах. Эти разности изменяются в пределах от 10,743 мГал до 17,755 мГал. Среднее значение разности – 13,930 мГал. Она и выражает среднюю разность между Потсдамской гравиметрической системой и гравиметрической системой Литвы на ее территории. Также составлена цифровая модель этих разностей (рис. 2). Она показывает систематические ошибки значений ускорения силы тяжести определяемых по гравиметрической карте.

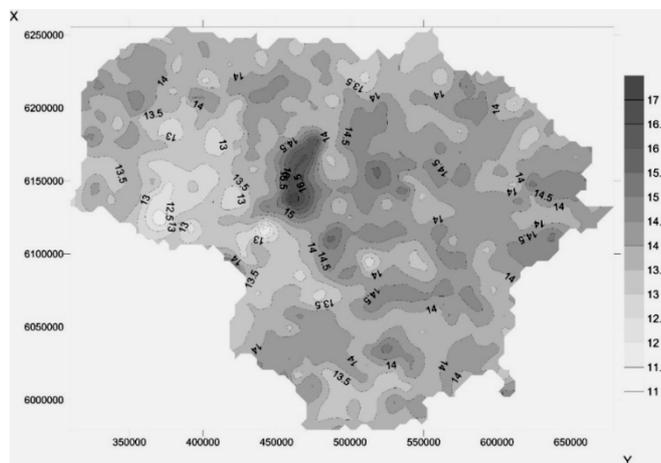


Рис. 2. Модель разностей ускорения силы тяжести (мГал)

Эти ошибки также относятся и к значениям ускорения силы тяжести на пунктах сети третьего класса, которые служили основой гравиметрической съемки территории Литвы. После элиминирования среднего значения разностей, была определена средняя квадратическая ошибка разностей, и с учетом точности измерений в гравиметрических пунктах получено, что средняя квадратическая ошибка ускорения силы тяжести, определенная по гравиметрической карте, равна 0,7 мГал.

Модель разностей ускорения силы тяжести может быть использована для редуцирования значений ускорения силы тяжести, полученной с гравиметрической карты, на гравиметрическую систему Литвы с учетом систематических ошибок. Для оценки такого редуцирования были использованы новые гравиметрические измерения на 228 пунктах вертикальной геодезической сети. Измерения производились в 2010–2012 гг. гравиметрами Scintrex CG-5, средняя квадратическая ошибка определений силы тяжести не превышала 14 мкГал. Для этих точек значения ускорения силы тяжести также были определены по гравиметрической карте с использованием модели разностей. Расхождение таким образом полученных значений ускорения силы тяжести от измеренных значений показаны на рис.3.

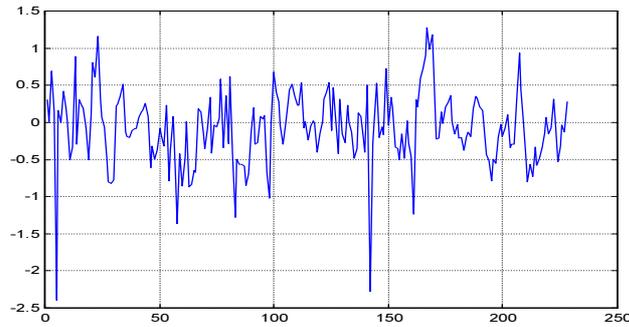


Рис. 3. Разности ускорения силы тяжести (мГал)

Средняя квадратическая ошибка ускорения силы тяжести, полученная по гравиметрической карте с учетом модели разностей уменьшилось от 0,7 мГал до 0,5 мГал.

Для уточнения квазигеоида территории Литвы представлены гравиметрические данные новой гравиметрической сети. Значения ускорения силы тяжести, полученные по гравиметрической карте, редуцированы на гравиметрическую систему Литвы, используя модель разностей ускорения силы тяжести. Также редуцированы и данные пунктов третьего класса.

Для всех гравиметрических пунктов вычислены аномалии силы тяжести [8]. Если измерения ускорения силы тяжести производились на глубине h , то аномалия силы тяжести в свободном воздухе $(g - \gamma_{80})$ на поверхности Земли вычислялась по формуле

$$(g - \gamma_{80}) = g - \gamma_{80}^0 + \Delta\gamma_{80}(H_{7z} - h) + 2\Delta g_{\delta}(h) + \Delta g_a(H_{7z}), \quad (6)$$

где γ_{80}^0 – ускорения силы тяжести нормального поля GRS 80

$$\gamma_{80}^0 = \gamma_{80e}^0 \frac{1 + k_{80} \sin^2 B_{94}}{\sqrt{1 - e_{80}^2 \sin^2 B_{94}}}, \quad (7)$$

$\gamma_{80e}^0 = 978032,67715$ мГал, $e_{80}^2 = 0,00669438002290$, $k_{80} = 0,001931851353$ – параметры нормального поля GRS 80 [9]; B_{94} – геодезическая широта LKS 94; H_{7z} – нормальная высота поверхности Земли в геодезической вертикальной системе LVS07 Литвы;

$$\Delta\gamma_{80}(h) = 0,30877(1 - 0,00142 \sin^2 B_{94})h - 0,75 \cdot 10^{-7} h^2 \quad (8)$$

– поправка за высоту в нормальном поле GRS 80 (мГал, h в метрах);

$$\Delta g_{\delta}(h) = 2\pi G \delta h \quad (9)$$

- поправка за промежуточный слой;

$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ - гравитационная постоянная;

$$\Delta g_a(H_{7z}) = 0,874 - 0,99 \cdot 10^{-4} H_{7z} + 0,356 \cdot 10^{-8} H_{7z}^2 \quad (10)$$

– поправка за атмосферу (мГал, H_{7z} в метрах).

Если измерения ускорения силы тяжести производились на высоте h над поверхностью Земли, то аномалия силы тяжести в свободном воздухе на поверхности Земли вычислялась по формуле

$$(g - \gamma_{80}) = g - \gamma_{80}^0 + \Delta\gamma_{80}(H_{7z} + h) + \Delta g_a(H_{7z}). \quad (11)$$

Для вычисления аномалий Буге использовалась формула

$$(g - \gamma_{80})\delta = (g - \gamma_{80}) - \Delta g_\delta(H_{7z}). \quad (12)$$

Если ускорение силы тяжести g измерены на высоте h , над поверхностью воды, то значение ускорения на поверхности воды g_j определялась по формуле

$$g_j = g + \Delta\gamma_{80}(h). \quad (13)$$

При измерении силы тяжести на глубине h , ее значение на поверхности воды вычислялась по формуле

$$g_j = g - \Delta\gamma_{80}(h) + 4\pi G_1,03h. \quad (14)$$

Аномалия силы тяжести в свободном воздухе, по значению ускорения силы тяжести на поверхности воды, определялась по формуле

$$(g - \gamma_{80}) = g_j - \gamma_{80}^0 + 0,874, \quad (15)$$

где 0,874 мГал – поправка за притяжения атмосферы на поверхности моря.

При вычислении аномалий Буге плотность морской воды увеличивалась до средней плотности Земной коры

$$(g - \gamma_{80})_\delta = (g - \gamma_{80}) + 2\pi G(\delta - 1,03)h_j, \quad (16)$$

где h_j – глубина моря.

Выводы. Для уточнения квазигеоида территории Литвы использованы данные новой гравиметрической сети, которая объединяет 686 пунктов. Средняя квадратическая ошибка уравненных значений ускорения силы тяжести на этих пунктах, не превышает 3 мкГал.

С использованием данных гравиметрической сети выполнена оценка точности гравиметрической карты масштаба 1:200 000. Выяснено, что средняя квадратическая ошибка значений ускорения силы тяжести, полученных по карте - 0,7 мГал.

Составлена цифровая модель разностей между значениями ускорения силы тяжести, полученных по карте, и измерениями гравиметрической сети. Используя эту модель для перехода от значений ускорения, полученных по карте, к значениям в гравиметрической системе Литвы, средняя квадратическая ошибка ускорения уменьшилась до 0,5 мГал.

Новая гравиметрическая система Литвы LSS07 принята на основании абсолютных гравиметрических измерений. Среднее значение разности ускорений Потсдамской и LSS07 гравиметрических систем на территории Литвы – 13,93 мГал.

Аномалии силы тяжести для уточнения квазигеоида вычислены с учетом разностей гравиметрических, а также геодезических координатных и высотных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petroškevičius P.* Determination of the Lithuanian territory Geoid / P. Petroškevičius, E. Paršeliūnas // *Geodesy and Cartography*, 1995. – No 2 (22). – P. 50–58.
2. *Būga A.* National report of Lithuania / A. Būga, P. Petroškevičius, E. Šleiteris, A. Zakarevičius // *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Prague, 2-5 June 1999.* – München, 1999. – P. 186-190.

3. *Mäkinen J.* Absolute-gravity measurements in Lithuania, Estonia and Latvia in 1994–1995 / J. Mäkinen, P. Petroškevičius, H. Sildvee, J. Kaminskis // European Geophysical Society, Annals Geophysicae: Supplement I to Volume 14. 1996. – P. C 231.
4. *Sas-Uhrynowski A.* Establishment of Lithuanian national gravimetric first order network / A. Sas-Uhrynowski, S. Mroczek, A. Sas, P. Petroškevičius, R. Obuchovski, D. Rimkus // Geodezija ir kartografija, 2002. – XXVIII, No 3. – P. 75-82.
5. *Paršeliūnas E.K.* Quality of Lithuanian national gravimetric network /E.K. Paršeliūnas, P. Petroškevičius // Harita dergisi: proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service, 2007, spec. iss. 18. – P. 388-392.
6. *Paršeliūnas E.* Some issues of the national gravimetric network development in Lithuania /E. Paršeliūnas, R. Obuchovski, R. Birvydienė, P. Petroškevičius, A. Zakarevičius, V.Č. Aksamitauskas, M. Rybokas // Journal of vibroengineering, 2010, Vol.12. – P. 685-690.
7. *Paršeliūnas E.* An investigation of the automatic relative gravimeters / E. Paršeliūnas, P. Petroškevičius, R. Obuchovski, R. Birvydienė // Mechatronic Systems and Materials V. Solid State Phenomena. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2013, Vol. 199, – P. 261-266.
8. *Torge W.* Gravimetry / W. Torge. – Berlin; New York: W. de Gruyter, 1989. – 465 p.
9. *Moritz H.* Geodetic Reference System 1980. / H. Moritz// Bull. Géod, 1994. –58 (3), – P.388–398.

Надійшла до редакції

10.03.2014

УДК 528.48

**Р.В. Шульц,
А.О. Анненков,
О.В. Мельник,
А.М. Хайлак**

ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ОСІДАННЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗА КАЛМАНОМ

Наведено загальні відомості про теорію фільтрації вимірювань за допомогою фільтра Калмана. На підставі аналогії до оброблення результатів динамічних спостережень за рухомими об'єктами та обробленням результатів геодезичних спостережень за переміщеннями й осіданням інженерних споруд, висловлено припущення про можливість використання фільтрації за Калманом для оброблення геодезичних спостережень. Виконано експериментальну перевірку роботи для фільтрації за Калманом оцінювання кінематичних параметрів осідального процесу на прикладі спостережень за осіданням гідротехнічної споруди.

Ключові слова: *фільтр Калмана, матриця переходу, матриця підсилення, кореляційна матриця, вектор станів, згладжування, прогнозування.*