

ГРАВИМЕТРИЧНИ ПОПРАВКИ И ФАКТОРИ ВЛИЯЕЩИ НА ВИСОКОТОЧНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ СИЛАТА НА ТЕЖЕСТТА

Ради Радичев¹, Емил Михайлов², Атанас Кисъов¹

¹Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; radirad@mgu.bg

²Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, 1113 София

РЕЗЮМЕ. Разгледано е влиянието на различните видове фактори при високоточните гравиметрични измервания с които е необходимо да се съобразяваме или да се въвеждат като поправки при тези измервания извършвани за опорни гравиметрични мрежи, високоточни гравиметрични снимки и геодинамични полигони. Необходимо е взимането под внимание на тези фактори при избора на гравиметрични точки за национални мрежи и геодинамични полигони.

GRAVIMETRIC CORRECTIONS AND FACTORS INFLUENCING THE HIGH PRECISION GRAVIMETRIC MEASUREMENTS

Radi Radichev¹, Emil Mihailov², Atanas Kisiov¹

¹University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; radirad@mgu.bg

²National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia

ABSTRACT. The influence of different factors in high precision gravimetric measurements is studied in order to estimate their effect and to enter the necessary changes in these measurements carried out to support gravimetric networks, precision gravimetric maps and geodynamic polygons. It is necessary to take into account all these factors when choosing gravimetric points for national networks and geodynamic polygons.

Увод

В случай на високоточни гравиметрични измервания, необходими за създаването на опорни гравиметрични мрежи, високоточни гравиметрични снимки и геодинамични полигони е необходимо да се отделя по голямо внимание на някои фактори, влияещи върху изменение на силата на тежестта във времето, и да се въвеждат съответните поправки. Определянето силата на тежестта на точка, става не върху горната повърхност на стабилизация на гравиметричната точка. Заради технически причини не може измерителната система на приборите да се отъждестви направо с гравиметричната точка и ние сме принудени да измерваме силата на тежестта недалече от гравиметричната точка. Но съществуват и различни по далечни фактори, измененията на които ще окажат влияние на значението на силата на тежестта върху гравиметричната точка. Ако вземем под внимание, че отделните пречещи влияния на тези фактори не превишават $\pm 50 \mu\text{Gal}$ (Инструкция, 1982) като знаем, че предполагаемата точност на измерване е около $\pm 5 \mu\text{Gal}$, за съвременните компютризирани гравиметри от вида на Scintrex CG-3 и Scintrex CG-5 при многократни измервания, ние трябва да въвеждаме корекции и в стойностите на "g" на гравиметричните точки заради различните фактори. През 2004 г. част от Софийския гравиметричен полигон беше измерен с компютризиран гравиметър Scintrex CG-3, а през 2007 г. същата част беше измерена с

компютризиран гравиметър Scintrex CG-5. С компютризираните грави-метри CG-3 и CG-5 се правеха по 60 отчета в минута, като за интервала на измерване от около 4 или 5 минути се извършваха 240 до 300 отчета, които се обработваха от компютъра на гравиметъра и се изчисляваха грешките от измерване. Резултатите от тези измервания и изравнения са дадени в таблица 1. Методиката на измерване и с двата гравиметъра е А-В-С-Д-С-В-А, като точността на измерванията е около $\pm 10 \mu\text{Gal}$ получена след обработка и изравнение. На Видинския полигон беше получена точност от измерванията от порядъка на $\pm 10 \mu\text{Gal}$ през годините от 1982 до 1987 с гравиметри от вида ГАГ-2, ГНУ-КВ (ГР/К2) и Sodin. С гравиметрите ГНУ-КВ, ГР/К2 и Sodin се правеха по три отчета, а при пълзене на отчетите се правеха и допълнителни отчети, като се избираха като окончателни трите най-близки отчета. А с гравиметрите ГАГ-2 се измерваха с висока точност от 3 до 5 ъгъла на наклона на ГАГ-2 на гравиметрична точка. Средната грешка от измерване ъгъла на наклона трябваше да е по-малка от 0,4". Като пример в таблица 2 са дадени измерени отсечки на полигона относно гравиметрична точка Гъмзово извършени през 1983 година със средните им квадратни грешки. Гравиметрична точка Гъмзово е приета за изходна при изчислението и изравнението на полигона, тъй като нивото на подпочвените води е на голяма дълбочина при нея.

Таблица 1. Измерени и изравнени разлики на "Δg" през различни години и с различни гравиметри на част от Софийския гравиметричен полигон

Отсечки	2007 г./CG-5, μGal	±m, μGal	2004 г./CG-3, μGal	±m, μGal	Разлика Δg, μGal
Симеоново-Драгалевци	+7,785	7	+7,768	8	17
Драталевци-Лифтов стълб	-24,752	7	-24,719	8	33
Лифтов стълб-Манастира	-17,128	3	-17,120	6	8
Симеоново-Бистрица	-14,232	3	-14,207	5	25

Таблица 2. Измерени разлики на "Δg" на полигона относно гравиметрична точка Гъмзово извършени през 1983 година със средните им квадратни грешки

Измерени отсечки през 1983	"Δg" измерено 1983 г.	Средни квадратни грешки в μGal (±m)
Гъмзово - Сланотрън	49.095	m = ±7
Гъмзово - Божурица	-4.601	m = ±6
Гъмзово - Кошава	52,443	m = ±10
Гъмзово - Видин	34,314	m = ±6
Гъмзово - Дунавци	-20.145	m = ±7

А в таблица 3, като пример са дадени гравиметрираните отсечки затворени по триъгълници с техните несфръзки за гравиметрите Sodin Prospektor. С тези гравиметри бяха измерени по 6 Δg на отсечка с един прибор.

Средните квадратни грешки след изравнение на всички триъгълници измерени с десете броя гравиметри са под ±10 μGal, както се вижда от таблица 4, където са дадени изравнените резултати от измерванията извършени през годините 1982 и 1983. Измерването е извършено по методиката А-В-А-В, чрез двукратни измервания по тази методика на всяка отсечка.

При разлика между гравиметрите по-голяма от 0,100 милигала за някои гравиметри се повтаряха измерванията само с тях, така че някои отсечки бяха измерени по 3 или 4 пъти. За извършване гравиметричните измервания на полигона бяха използвани 10 броя гравиметри, както споменахме от горпосочените видове. Или за всяка отсечка бяха измерени от 40 до 60 разлики в силата на тежестта (Δg).

Голяма част от изследванията свързани с влиянието на различните видове фактори и поправки са направени на този гравиметричен полигон.

Таблица 3. Осреднени несфръзки (W) от гравиметрично измерените триъгълници с два гравиметъра Sodin Prospektor през 1983 година

Измерени гравиметрично триъгълници с гравиметри Sodin Prospektor; средно от 2 прибора	Несфръзки в триъгълниците W, μGal
Гъмзово – Кошава – Сланотрън – Гъмзово	+2
Гъмзово – Сланотрън – Видин – Гъмзово	-15
Гъмзово – Видин – Дунавци – Гъмзово	+1
Гъмзово – Дунавци – Божурица – Гъмзово	+10
Кошава – Сланотрън – Видин – Кошава	-14
Видин – Сланотрън – Дунавци – Видин	+3
Видин – Дунавци – Божурица – Видин	-19
Гъмзово – Кошава – Видин – Гъмзово	+5
Гъмзово – Видин – Божурица – Гъмзово	+30
Гъмзово – Сланотрън – Дунавци – Гъмзово	-11

Приливи

Луната и слънцето оказват влияние върху полето на силата на тежестта на Земята. При високоточни гравиметрични измервания е необходимо да се отчитат фазите на Луната и положението на Слънцето. Поправката достигаше ±300 μGal за района на Видинския полигон по време на извършените измервания през годините от 1982 до 1987. При съвременните компютризирани гравиметри с точност на измерванията около ± 5 μGal е необходимо да се взема на предвид тази поправка, а също и при извършването на високоточни измервания със статичните

Таблица 4. Изравнени разлики на "Δg" на отсечките от Видинския полигон, измерени през 1982 и 1983 години със средните квадратни грешки след изравнение

Точки	Изм.1982 есента, μGal	±m, μGal	Изм.1983 пролетта, μGal	±m, μGal	1983-1982, μGal
Гъмзово	00.000	-	00,000	0	0
Видин	34.309	±6	34,302	±5	-7
Кошава	52.420	±7	52,468	±6	+48
Сланотрън	49.081	±6	49,091	±5	+10
Дунавци	20.162	±6	20,149	±5	-13
Божурица	-4.596	±7	-4,610	±6	-14

гравиметри от вида ГНУ-КС и ГНУ-КВ. Тези поправки за приливи се дават във вид на таблици и графики за отделни страни и райони, регистрирани с приливни гравиметри в приливни станции. За Видинския полигон бяха използвани таблиците и графиките изработени от Чехската геодезическа служба за този период от 1982 до 1987 години.

Влияние изменението на атмосферното налягане върху силата на тежестта

Плътността на атмосферата се изменя с времето и създава променливо налягане на повърхността на сушата, моретата, големите реки и техните дъна, като предизвиква деформации. При измерване силата на тежестта с грешка под $\pm 5 \mu\text{Gal}$ следва да се отчете, както правото притегляне на променливите аномални маси на атмосферата, така и предизвиканите от тях деформации. По формули от (*Повторные...*, 1980) е изчислено изменението силата на тежестта предизвикано от атмосферното налягане на територията на Видинския гравиметричен полигон, и същото е приблизително $2,3 \mu\text{Gal}$.

Отчитане влиянието на големите водни източници върху изменението на силата на тежестта

Такова влияние беше оценено на времето при изследванията направени на Видинския полигон от река Дунав върху близките до нея точки, като се използва формулата 5

$$\delta g = f \cdot (M/R^2) \cdot \sin^2 \alpha \quad (1)$$

където:

f – гравитационна постоянна равна на $(6,673 \pm 0,003) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{r}^1 \cdot \text{c}^{-2}$

M – маса на водата между ниски и високи води

R – разстояние от геометричния център на масата до точката на наблюдение

α – ъгъл между направлението R и хоризонта.

Изменението на δg между ниво високи и ниски води на река Дунав за точките в Кошава, Сланотрън, Дунавци и Видин е дадено в таблица 5.

Таблица 5. Изменение на δg между високи и ниски води на р. Дунав

Наименование на точките	$\delta g, \mu\text{Gal}$	Разстояние от р. Дунав
Видин	30	40 метра
Кошава	35	50 метра
Сланотрън	17	900 метра
Дунавци	10	1200 метра

Комплексно влияние на подпочвениите води и влажността на почвата върху изменението на силата на тежестта

Изследванията направени в други страни са показали (*Повторные...*, 1981; 1982) че най-съществени изменения на силата на тежестта могат да възникнат от изменение във време режима на подземните води /подпочвени и влажност на почвата/. От изменение нивото на подземните води се изменя плътността на промеждутъчния слой.

Възможното изменение силата на тежестта може да се констатира от точни гравиметрични измервания, каквито бяха извършени на Видинския полигон с максимално достижима грешка след изравнение под $\pm 10 \mu\text{Gal}$. За установяване на горепосоченото изменение беше направен модел на Видинския полигон на базата на данни от измервания. Съгласно (*Сборник*, 1980; Михайлов, 1984) най-добри резултати за възможно изменение силата на тежестта се получават по формулата за плоскопаралелен слой с безкрайно простиране (Демянова, Михайлов, 1985):

$$\delta g_v = 2\pi f \Delta \sigma \Delta h \quad (2)$$

където:

Δh – е амплитуда на колебание нивото на подземните води в метри измерена в кладенците на Видинския полигон;

$$2\pi f = 0.0418$$

$\Delta \sigma$ – изменение плътността на водоносния пласт при загуба или поглъщане на вода.

На точките Видин, Кошава, Сланотрън и Дунавци почвите основно са алувиални, за които коефициентът на водоотдайност е 0,42 и формула 2 добива следния вид:

$$\delta g_v = 0,0176 \Delta h \quad (3)$$

В таблица 6 се дават разликите в резултатите от измерване силата на тежестта при ниски и високи подземни води, а също така и възможното изменение силата на тежестта, получено чрез моделни данни по формули 2 и 3. Резултатите в таблица 3 са получени на базата на измерванията и изчисленията на Видинския полигон извършени през 1982 и 1983 години.

Таблица 6. Разлики в силата на тежестта от гравиметрични измервания при високи и ниски подземни води и от моделни данни по формули 2 и 3

Имена на точките	Разлики в "g" от гравиметрични измервания при високи и ниски подземни води в μGal	Резултати от моделни данни по формули 2 и 3 в μGal
Видин	-7	-2
Гъмзово	0	0
Кошава	+48	+62
Сланотрън	+10	+24
Дунавци	-13	-15
Божурица	-14	-8

Влияние на преместването на масите във вътрешността на Земята

Преместването на масите във вътрешността на земята се проявява на нейната повърхност при провеждане повторни високоточни геодезически измервания. Данните от повторната нивелация се използват за изучаване на съвременните вертикални движения на земната кора, явяващи се следствие на процесите, протичащи в земните недра. В някои изследователски работи е показано (*Повторные...*, 1980), че половината от величината на скоростта на съвременните вертикални движения може да създаде ефект, създаван от изменението на наклона на

нивовърхнините с течение на времето, който се фиксира при нивелирането, и от своя страна се явява причина за изменение на силата на тежестта. От *Сборник* (1980), имаме:

$$\delta g = \vartheta \gamma \quad (4)$$

Ъгълът ϑ се определя от резултатите на нивелиране

$$\vartheta = \delta h / s \quad (5)$$

където:

δh – е изменение превишението между точките за една година;

s – разстояние между точките;

γ – нормално значение на силата на тежестта;

ϑ – ъгъл на пълно отклонение на отвеса.

Оценката на такава вариация получена за Видинския полигон е 2,0 μGal .

Привеждане ускорението на силата на тежестта към центъра на знака

При измервания с два, три и повече гравиметри едновременно е необходимо да се приведе ускорението силата на тежестта към центъра на точката, където е репера, защото гравиметрите при наблюдение се поставят ексцентрично. Необходимо е да се определят хоризонталните градиенти (Дивиш, 1977; *Инструкция...*, 1982) W_x и W_y . Определянето им може да стане по косвен начин на базата значенията на ускоренията на силата на тежестта измерени с гравиметър. Практически с гравиметър измерваме ускорението силата на тежестта в осем точки, лежащи на окръжност с радиус r около центъра P_0 на гравиметричната точка. Величината на радиуса се избира в зависимост от местните условия, така че точки 1,2,3,4,5,6,7,8 да се намират на една и съща равнина. Съгласно (Дивиш, 1977) при точност на измерване разликата $g_1 - g_0 = 1 \mu\text{Gal}$ и $R = 10 \text{ m.}$, градиентите се определят с точност до $\pm 1 \mu\text{Gal}$. Изчисляваме разликите $g_1 - g_0; g_2 - g_0; g_3 - g_0; \dots; g_8 - g_0$ и съответстващите средни градиенти $W_1 = (g_1 - g_0) / r; W_2 = (g_2 - g_0) / r; W_3 = (g_3 - g_0) / r; \dots$ и т.н. Определя се максималния градиент $W_{\alpha z}$ и неговия азимут α_0 с точност пет градуса спрямо север. В градиентите W_1, W_2, W_3 и т.н. се включва влиянието на наклона на стабилизация на точката, затова не трябва да се извършва измерване на височините 1,2,3,.....8. Достатъчно е да се знаят само височините на приборите (гравиметрите) над повърхността на стабилизирание. Височините на някои гравиметри са дадени в таблица 7.

Таблица 7. *Работни височини на гравиметрите*

Вид на гравиметъра	Височина, mm	Височина на статива, mm
<i>А. Кварцови</i>		
ГНУ, KB и КС	140	не
Sodin, Sharp	120	90 или 250
Worden	130	90 или 250
ГАГ-2	150	400
<i>Б. Металически</i>		
La Costa & Romberg	100	250
GS-11(12-15)	200	400
<i>В. Махални</i>		
ОВМ	200	не

Привеждането на ексцентричните измервания към центъра става по формулата (Дивиш, 1977):

$$g_0 = g - r \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) \cdot W_{\alpha z} - z \cdot (W_{zz})_p \quad (6)$$

където:

r – е разстояние между центъра на гравиметричната точка P_0 и точка P от окръжността, r е достатъчно да се знае с точност 0,2 m;

z – височина на системата на гравиметъра над равнината на гравиметричната точка;

$W_{\alpha z}$ – максимален хоризонтален градиент;

W_{zz} – вертикален градиент.

На Видинския полигон хоризонталните градиенти получени от експериментални измервания на гравиметрична точка Гъмзово бяха в границите на грешките от измерване до $\pm 10 \mu\text{Gal}$.

Измерване на вертикални градиенти и привеждане на абсолютни измервания към хоризонталната повърхност на стабилизация на гравиметричната точка

При измервания с абсолютни гравиметри, ускорението на силата на тежестта g_0 се отнася към точка, намираща се на височина z , относно горната повърхност на стабилизация на гравиметричната точка. Ускорението g на равнината на стабилизация /на репера/ се изчислява по формула:

$$g = g_0 + z \cdot W_{zz} \quad (7)$$

Значението z за всеки абсолютен гравиметър е точно познато, и е възможно да се приеме, че $m(z) = 0$. Разстоянието между основата на прибора и точката, за която значението g се получава от наблюдение е z . Гравиметричните измервания на абсолютните точки в България са извършени с абсолютни гравиметри ГАБЛ, JILA и ZZG (Милев и др., 2005). Вертикалните градиенти W_{zz} се измерват със статични гравиметри с висока точност по методиката АВАВАВА, двукратно при смяна на диапазона. Значенията на вертикалните градиенти се получават с точност до десета от *микрогола*. В таблица 5 са дадени значенията W_{zz} измерени на гравиметричните точки в София и Варна. На тези точки са извършени абсолютни гравиметрични измервания с гравиметри ГАБЛ и JILA, а на гравиметричната точка в София е мерено и с полския абсолютен гравиметър ZZG. От таблица 8 се вижда, че имаме по-големи разлики в W_{zz} за София в годините 1982, 1983 и 1999. През 1982 и 1983 години се строеше новата сграда на Кадастъра, там беше изкоп /котловава/, а през 1999 година беше вече построена новата сграда. Също така във Варна, през 1982 година сградата на обсерваторията не беше ремонтирана, а през 2004 година беше извършен цялостен ремонт на астрономичната обсерватория, както и допълнително пристрояване. Това оказва влияние на изменението на W_{zz} през различните периоди на измерване. Вертикалният градиент се изменя също, както в зависимост от надморските височини на точките, така и от разстоянието на същите до близки водни площи. На Видинския полигон през октомври 1984 година, бяха извършени високоточни гравиметрични измервания на вертикалните градиенти W_{zz} на шестте гравиметрични точки с гравиметрите Sodin 161 и 162 на статив с височина 400 mm. Резултатите от тези

измервания са дадени в таблица 9. Неприливните изменения на вертикалния градиент на силата на тежестта, измерван през различни периоди от време може да се използват за изследвания в сеизмични райони, както и за изучаване на плътностните нееднородности на земната кора при геодинамични полигони.

Таблица 8. Вертикални градиенти W_{zz} , измерени на абсолютните точки София и Варна.

Станция	Гравиметър	Години	W_{zz} [μ Gal] при $h=1000$, mm
София	La Costa & Romberg	1999	307,6
София	ГР/К2, ГАК-7Т	1982	302,8
София	Sodin	1983	301,6
Варна	ГР/К2, ГАК-7Т	1982	285,1
Варна	La Costa & Romberg	2004	291,0

Таблица 9. Измерени вертикални градиенти W_{zz} на гравиметричните точки от Видинския полигон

Местонахождение на гравиметричната точка	Средно W_{zz} [μ Gal] от Sodin 161 и 162 при $h=400$, mm	Разстояние от р. Дунав до г.т., m	Кота на г.т., m
Бажурица	119,0	15700	113
Дунавци	114,0	1200	43
Кошава	120,5	50	35
Гъмзово	123,5	14500	233
Сланотрън	108,0	900	36
Видин	121,5	50	35

Изводи

От всичко казано досега се вижда, че при високоточни гравиметрични измервания е необходимо при някои случаи да се въведат поправки заради различните фактори.

Да се внимава с избора на гравиметрични точки при високоточни мрежи, така че влиянието на пречещите фактори да е минимално, в рамките на точността или да се вкарват поправки.

В каталозите на гравиметричните мрежи, където е описанието и репеража на точките е необходимо да се

дават данни за релефа около самите точки, нивото на подземните води, атмосферното налягане в момента на измерване, близки водни площи до точките и други фактори.

Изследванията направени на Видинския полигон за периода 1982-1987 години показват, че и със статичните гравиметри от горепозначените видове може да се получава същата точност, както точността на съвременните компютризираните гравиметри при наличието на повече измервания и по-голям брой гравиметри, което се вижда от таблици 1 и 2.

Литература

- Демянова, Т., Е. Михайлов. 1985. Хидроложки ефект при гравиметрични измервания, проведени на Видинския полигон. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 6, 14-15.
- Дивиш, К. 1977. Елементи приведения при гравиметрических измерениях. Прага, Геодезическая служба ЧССР, 12-13.
- Инструкция для работ в Единой гравиметрической сети и для гравиметрических работ, проводимых в международном сотрудничестве.* 1982. Прага, Проект.
- Милев, Г., Д. Руес, К. Улрих, К. Василева, Л. Стоянов, Г. Вълев, Е. Михайлов, Н. Димитров. 2005. Абсолютни измервания и гравиметрична система на България. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 5-6, 10-17.
- Михайлов, Е. 1984. Изследване изменението на силата на тежестта в зависимост от хидроложките условия на Видинския полигон. – *Бюлетин ГУГКК*, 2, 17-19.
- Михайлов, Е. 1984. Фактори оказващи влияние върху изменението на силата на тежестта във време, на територията на Видинския гравиметричен полигон. – *Бюлетин на ГУГКК*, 3, 15-17.
- Повторные гравиметрические наблюдения. Вопросы теории и результаты. Сборник научных трудов по исследованию неприливных изменений силы тяжести и сопутствующих разработок в области аппаратуры и методики работ.* 1980. М., АН СССР, 27-33, 34-41, 53-59.
- Повторные гравиметрические наблюдения. Сборник научных трудов.* 1981. М., АН СССР, 8-22.
- Повторные гравиметрические наблюдения. Сборник научных трудов.* 1982. М., АН СССР, 38-54.