

МЕТОДИКА НА НАБЛЮДЕНИЯТА ПРИ ПРОФИЛНИ ГРАВИМЕТРИЧНИ СНИМКИ ПО ЛИНИИ ОТ ДЪРЖАВНАТА НИВЕЛАЦИЯ НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ради Радичев¹, Емил Михайлов², Николай Кирилов¹

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

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

РЕЗЮМЕ. Обоснована е необходимостта от извършването на гравиметрични измервания по линии от Държавната нивелация на територията на Република България. Предлага се методика за извършването им с обосновка за точността на измерванията. Така извършената гравиметрична снимка, може да послужи за геодезически, геофизични и геоложки цели, както и за реамблиране на гравиметричните карти в мащаби 1:200000 и 1:100000.

METHODS FOR PROFILE GRAVIMETRIC MEASUREMENTS ALONG THE LINES OF NATIONALE LEVELING NETWORK

Radi Radichev¹, Emil Mihailov², Nikolai Kirilov¹

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 necessity of performance of gravimetric measurements along lines of the National leveling network on the territory of the Republic of Bulgaria is proven. Methods for their accomplishment are proposed with a justification for the accuracy of the measurements. The performed in such a way gravimetric study can serve for geodetic, geophysical and geological aims, as well as for development of gravimetric maps in scale 1:200000 and 1:100000.

Необходимост от гравиметрични измервания по нивелачни линии

При изчисляване на надморските височини в *Балтийска система*, както и при преминаване във височинна система *Амстердам* на реперите от държавната нивелация (Беляшки, 2008) е необходимо към измерените стойности на превишенията да се прибавят гравиметрични поправки (поправки за непаралелност на ниво повърхнините на нормалното гравитационно поле и поправки за разлика между действителното и нормалното гравитационно поле). Обединената европейска нивелачна мрежа (UELN), в която участва и Република България вече е изравнена. Като окончателен резултат са получени нормални височини и геопотенциални коти (Милев и др., 2008). Използвайки резултатите от нивелиране и измерване на силата на тежестта на Земята по линията на нивелиране, се намира разликата в потенциалите между изходната и определяемата точки.

$$W_0 - W_M = \sum g_i \cdot dh_i \quad (1.1)$$

където: g_i – измерено значение на силата на тежестта на станция i от нивелачния ход, dh_i – измерено превишение на същата станция, $W_0 - W_M$ – разлика в потенциалите на две точки наречена геопотенциална кота или геопотенциално число.

Геопотенциалната кота (число) се получава по данни от геометричната нивелация и от гравиметричните измервания по реперите. За получаване на геопотенциалните коти (числа) на нивелачните реperi се взимат средните стойности на g_{cp} между реперите и съответните им превишения Δh . От формула (1.1) се вижда, че колко по-точно са извършени нивелацията и гравиметрията, толкова по точно се получават геопотенциалните коти (числа). При гравиметрични измервания по нивелачни линии най-производителна е методиката на еднократни измервания с контролни точки. Обикновено измерванията по тази методика се извършват с два статични гравиметъра за по добър контрол на резултатите. Такива са гравиметрите от вида ГАК, ГР/К2, ГНУ-КС или ГНУ-КВ, които са на разположение в Република България. Тези гравиметри са нетермоста-тирани и мащабните им коефициенти зависят от температурата, атмосферното налягане и скаловите им поправки. Същите имат по-голямо изместване на нулите в сравнение с гравиметрите La Coste @ Romberg и Scintrex CG-3 и CG-5.

Изместване на нулата на употребяваните в България кварцови гравиметри

Действителното изместване нулите на гравиметрите има сложен характер и не може да бъде прогнозирано напълно. Вълнообразното изменение на нулата на

гравиметрите с време даже по малко от един час е обусловено от процесите на поляризация на кварцовата система. Замяната на вълнообразната линия на изместване на нулевата точка с права, както се практикува в гравиметрията е приблизително и довежда до понижаване точността на резултатите при високоточни гравиметрични снимки. Точността при еднократни наблюдения е по-ниска отколкото точността при многократни измервания за горепосочения тип гравиметри. Обикновено наблюденията с различни статични гравиметри са съпроводени с големи систематични разхождания на резултатите между тях. Понеже наблюденията с двата гравиметъра се провеждат по едно и също време и при едни и същи условия, разликите имат систематичен и случаен характер и са свързани с техническите особености на приборите и с микросейсмиката създавана от движещите се превозни средства (Милев и др., 2008). Разликите между приборите са обусловени и от криволинейното изместване на нулите им и от колебание мащабните коефициенти на отчетните устройства от транспортиране на гравиметрите.

Използване на гравиметри от вида ГАК-7Т, ГР/К2, ГНУ-КВ и ГНУ-КС за гравиметрични снимки в Република България

Тези гравиметри може да се прилагат за детайлни, регионални и маршрутни /профилни/ снимки с разстояния между точките от десетки метри до 10-15 km. и повече. Основни части на всеки гравиметър са: измерителна част със собствения корпус на гравиметъра и външния корпус с топлозащитния стълб за пренасяне на гравиметъра. Цялата измерителна част е поместена в съда на Дюар, обезпечаващ надеждна защита на системата от резки температурни изменения на окръжаващата среда. В гравиметъра е монтиран температурен компенсатор, действащ ефективно в диапазон на температурите от -15° до $+15^{\circ}\text{C}$ от точката на пълна температурна компенсация. Средната им грешка на измерване се колебае от $\pm 0,030$ до $\pm 0,060$ mGal, а при гравиметър ГНУ-КВ тя е до $\pm 0,030$ mGal. Гравиметрите на НИГаФ – ЕООД с номера 1514, 689 и 1388, както и гравиметъра на УАСГ номер 524 са със специално изготвени кварцови системи в Гравиметричната лаборатория на гр. Бургас от С. В. Вереда. Такива системи се изготвяха за всички гравиметри в наличност на Геофизичните предприятия. Тези системи са с по-висока чувствителност и точност на отчета около 0,010 милигала. Модернизирането на тези системи се състои в свеждане до минимум величината на пълзене на нулевата точка, неутрализация (йонизация) на електростатическите заряди, съществена компенсация на температурните влияния и премахване на вредни колебания на махалото на системата. Затова при тези гравиметри е най-добре да се използват мащабните коефициенти получени на специални полигони, а не в лабораторни условия в предвид на това, че системите на тези гравиметри видимо изменят своите свойства след като бъдат изведени от състояние на покой /т.е. при транспортиране с автомобил/. Най-добре е еталонирането на тези гравиметри да се прави преди започване на гравиметричните измервания и след завършването им, т.е. два пъти, понеже лабораторията в Бургас и гравиметричната лаборатория в София са унищожени и не е възможно вакуумирането на сега действащите гравиметри в Република България. А

както се знае липсата на вакуум в кварцовата система води до изменение на мащабния коефициент, а също така и до по-големи разхождания на резултатите между гравиметрите.

Методика и точност на гравиметрични измервания по нивелачни линии

При извършването на гравиметрична профилна снимка най-производителна е методиката, както подчертахме на еднократни измервания с контролни точки. Започва се от гравиметрична точка А минава се през реперите 1, 2, 3, 4, 5, и 6 след което се връщаме отново в А за отчитане преместването на нулевата точка, като преди това се извършва повторно наблюдение на някои от реперите обикновено средния или при шест наблюдавани репера се повтаря третия. Реперите при тази методика ги записваме така: А, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 3, А, 6. Реперите от А до 6 образуват едно звено на гравиметричния ход на измерване. Всяко звено се състои от q точки. При всяко звено се извършват по две или три измервания на първата и последната точки, и по едно на междинните и две на контролните точки. Точките при които имаме изпълнени по две или три наблюдения са работни опорни точки. Броят на наблюденията (k) в звеното (L) е свързан със следното съотношение съгласно (Любимов и др., 1970):

$$L = (k-1)/(2q-1) \quad (2.1)$$

и съответно средната квадратична грешка на работните опорни точки е (Любимов и др., Г. 1970) :

$$\varepsilon_{\text{раб.оп.}} = \varepsilon_{\Delta N} \sqrt{(L^3 - 2)/6L(L-1)} \quad (2.2)$$

а за междинните гравиметрични точки е:

$$\varepsilon_{\text{межд.}} = \varepsilon_{\Delta N} \sqrt{(L^3 + 6L^2 - 1)/12L^2} \quad (2.3)$$

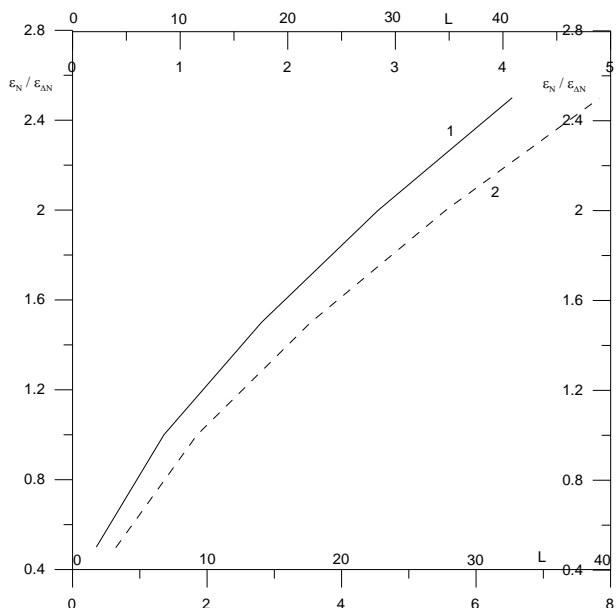
където $\varepsilon_{\Delta N}$ е средна квадратична грешка, която за равноточни измервания е постоянна. Зависимостта на величините на средните грешки от наблюденията на работните точки 1 и междинни точки 2 от броя на звената (L) е дадена на фиг. 1 по данни от (Любимов и др., 1970). За да се избере рационална структура на гравиметричния рейс на наблюдение е необходимо да разгледаме зависимост на параметъра m от броя на точките q в звеното според (Любимов и др., 1970). Ако с r обозначим отношението на времето на прехода между съседни репери към времето на наблюдение на репер имаме че (Любимов и др., 1970):

$$m = [(r+1)(q-1)]/[r(q-1)+1] \quad (2.4)$$

като връзката между параметрите m , r и q е дадена на фигура 2 по данни от Любимов и др. (1970).

Да разгледаме, при гравиметрични измервания по нивелачни линии, количествената зависимост между точността на профилната снимка и нейните основни параметри, които могат да бъдат използвани за избор на оптимални условия при провеждане на гравиметрични наблюдения. Ако искаме да извършим гравиметрични

измервания по нивелачна линия дълга 50 километра, като разстоянието между реперите е около 1000 метра (1 километър), и при зададена точност на наблюдение $\varepsilon_{\Delta N} = \pm 0,150 \text{ mGal}$. В началото и в края на нивелачната линия има гравиметрични точки от Еталонната гравиметрична мрежа на Република България.



Фиг. 1. Зависимост на величините на средните грешки от наблюденията на работните опорни точки 1 и междинни точки 2 от броя на звената (L)

Гравиметрите от вида ГАК и ГР/К2 могат да постигнат средна квадратична грешка от единично измерване приблизително около 0.100 mGal при гравиметрични измервания по пътища с не много натоварено движение. Времето необходимо за преход с кола от един репер до друг е около 12 минути, а наблюдението на точка трае около 3 минути, откъдето получаваме, че

$$r = 12/3 = 4 \quad (2.5)$$

От фиг. 2 следва, че при $r = 4$, величината на параметъра m с увеличаване на броя на точките q в звеното се мени незначително и m клони към 1.5 . При 6 броя точки в звеното средната квадратична грешка от измерване нарастванията не превишава 1.5 , което за дадения случай е: $\varepsilon_{\Delta N} = 1.5 \cdot 0.10 = 0.15 \text{ mGal}$. От фиг.1 намираме, че $\varepsilon_N / \varepsilon_{\Delta N} = 0.15/0.15 = 1.00$ и максимално допустимия брой на звената L в гравиметричния ход е 10 . Броят на звената L е свързан с броя на точките в рейса (Q) и в звеното (q) със съотношението (Любимов и др., 1970):

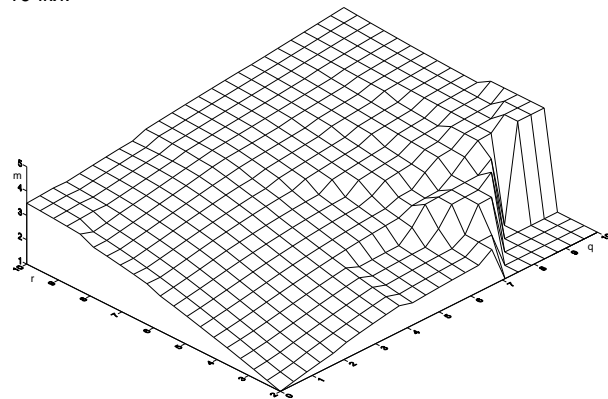
$$L = (Q+1)/(q-1) \quad (2.6)$$

Или броят на точките за всяко звено от рейса за нашия случай при $Q = 50$ за едно звено ще бъде (Любимов и др., 1970):

$$q = (Q+L-1)/L = (50+10-1)/10 = 6 \quad (2.7)$$

където q е броят на точките в звеното и в нашия случай е 6 . Или ако искаме точност на наблюдение около $\pm 0,150 \text{ mGal}$, то по еднократна методика на наблюдение ние

трябва да наблюдаваме през 6 точки, като седмите се използват за работни опорни (възлови) гравиметрични точки.



Фиг. 2. Зависимост на m от броя на точките q в звеното с различни значения на r

Фигури 1 и 2, както подчертахме по-горе са построени въз основа на данни от Любимов и др. (1970). От експериментални гравиметрични измервания по линии от Държавната нивелация на Република България, извършени с гравиметри собственост на Минногеоложкия университет се потвърждава гореописаната методика. От таблица 1 (Ценков, 2011) се вижда, че до около 1 час гравиметричните измервания не се повлияват съществено от приливите изменения на силата на тежестта и не се включват отделно при обработка на гравиметричните измервания.

Таблица 1

Ср.кв. грешка	Време на измерване	Брой репери	Гравиметри номера	Собственост на приборите
$\pm 0,002$	0 часа 40 мин.	4	ГР/К2 № 138	МГУ
$\pm 0,016$	0 часа 42 мин.	4	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,055$	0 часа 53 мин.	5	ГР/К2 № 138	МГУ
$\pm 0,024$	0 часа 50 мин.	5	ГНУ-КВ № 296	МГУ
$\pm 0,097$	0 часа 47 мин.	5	ГР/К2 № 138	МГУ
$\pm 0,072$	0 часа 45 мин.	5	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,016$	1 час 10 мин.	7	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,088$	1 час 12 мин.	7	ГР/К2 № 138	МГУ
$\pm 0,074$	1 час 12 мин.	7	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,055$	1 час 10 мин.	7	ГАК-7Т № 71	УАСГ
$\pm 0,077$	1 час 20 мин.	8	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,055$	1 час 22 мин.	8	ГАК-7Т № 71	УАСГ
$\pm 0,086$	1 час 30 мин.	8	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,097$	1 час 35 мин.	8	ГАК-7Т № 71	УАСГ
$\pm 0,099$	2 часа 40 мин.	13	ГНУ-КВ № 296	МГУ
$\pm 0,285$	2 часа 45 мин.	13	ГР-К2 № 138	МГУ
$\pm 0,295$	2 часа 45 мин.	15	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,289$	2 часа 47 мин.	15	ГАК-7Т № 71	УАСГ
$\pm 0,237$	2 часа 56 мин.	17	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,376$	3 часа 00 мин.	17	ГАК-7Т № 71	УАСГ
$\pm 0,337$	3 часа 50 мин.	21	ГАК-7Т № 524	УАСГ
$\pm 0,312$	3 часа 50 мин.	21	ГР/К2 № 138	МГУ

Изчислява се изместването на нулевите точки на гравиметрите от по-голям брой опорни и работни

гравиметрични точки. Както се вижда от таблицата, средните квадратни грешки на звено от 7 до 8 репера, измерено за около 1 час или 1 час и 35 минути са до $\pm 0,100$ милигала. При времетраене над 2-3 часа средните грешки скачат под и над $\pm 0,300$ милигала. Или до около 1 час изместването на нулите на гравиметрите може да се счита за линейно.

Зависимост между стойностите на силата на тежестта от височините на реперите и получаване стойностите на “g” и “ $\Delta g_{\text{Фай}}$ ” на унищожени /неоткрити/ нивелачни репери

В Евсеев (1957) е показана зависимост на “g” и “ $\Delta g_{\text{Фай}}$ ” от височините H на гравиметричните точки, съответно:

$$g = A + B \cdot H \quad (3.1)$$

и

$$\Delta g_{\text{Фай}} = A + B \cdot H \quad (3.2)$$

Коефициентите A и B се намират лесно от решаване на система уравнения.

Обикновено нивелачните и гравиметрични измервания се правят от различни екипи и по различно време. При ремонт на пътища се унищожават репери, които не могат да бъдат гравиметрирани по късно след нивелацията. Също така някои репери при нивелачни линии минаващи в планински райони се поставят на места където не могат да бъдат открити от групата извършваща гравиметричните измервания. Тогава за получаването стойностите на “g”, може да се използва формула (3.1) и се съставя система от уравнения, като коефициентите A и B се получават от решаване на тази система при известни стойности на “g” и “H” на репери.

Сгъстяване на гравиметрична снимка на Република България с резултати от гравиметрични измервания по нивелачни линии

Гравиметричните измервания ускорението на силата на тежестта, както подчертахме се извършват по нивелачните линии по еднократна методика с контроли точки. Гравиметрират се по-голям брой работни опорни и контролни точки, за следене работата на гравиметрите с течение на времето и по-добър контрол на резултатите от гравиметричните измервания. Гравиметрирането на реперите по нивелачните линии I клас, се извършва с два гравиметъра, за да се намали обема на систематичните грешки при измерване и да се увеличи контрола на измерванията, тъй като движението на транспортни средства е доста натоварено по пътищата на страната. Понеже наблюденията с двата гравиметъра се провеждат по едно и също време и при едни и същи условия, разликите между тях имат систематичен характер и са свързани с техническите особености на приборите, както подчертахме. Разликите между приборите са обусловени, както от криволинейното изместване на нулевите им точки, така и от колебание мащабните коефициенти на отчетните устройства от изменение вакуума в кварцовите системи на гравиметрите, а също и от транспортиране на гравиметрите. Гравиметрираните нивелачни линии, както подчер-

тахме се привързват към точките от *Еталонната гравиметрична мрежа на Република България, която е привързана към базисната мрежа от абсолютни точки (UEGN, 2002) (Милев и др., 2005; 2008)*. По този начин, чрез извършването на профилни гравиметрични снимки се получават точни резултати за координати, коти и земно ускорение.

Изводи

Със средствата отпускани за преизмерване на Държавната нивелачна мрежа на Република България I клас и за гравиметрирането ѝ, същата ще може да съгсти гравиметричната снимка със средна грешка на гравиметриран репер под $\pm 0,300$ милигала. Макар и остаряла наличната гравиметрична апаратура в България може да осигури точност от еднократно измерване на репер доста по-малка от $\pm 0,300$ милигала. От направените изследвания и еталонирания на гравиметрите през последните години, като по-стабилни и надеждни за гравиметрични измервания и способни да осигурят тази точност се оказват гравиметрите ГНУ-КВ №296, ГР/К2 №1319, ГНУ-К2 №138 и ГНУ-КС №384, собственост на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”. *Необходимо и задължително е да се използва каталогът на Еталонната гравиметрична мрежа, намиращ се в Агенцията по геодезия, картография и кадастър от фирмите изпълнители на гравиметричните работи.* Данните от извършваните профилни гравиметрични снимки по нивелачни линии могат да се използват освен за геодезически цели, също така и за геоложки и геофизични цели, както и за по-точно определяне на геоида на Република България, така също и за реамболиране на гравиметричните карти на Република България в мащаби 1:200000 и 1:100000.

Литература

- Беляшки, Т. 2008. Държавна нивелачна мрежа I клас на България. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 5-6, 8-10.
- Евсеев, С. В. 1957. *О некоторых закономерностях гравитационного поля земли и их значения для геодезии и геофизики*. Киев, Изд. АН УССР, 72 с.
- Любимов, Г. А., А. А. Любимов, В. И. Павловский. 1970. К выбору оптимальной методики гравиметрической съемки способом приращении. – *Прикладная геофизика*, 58.
- Милев, Г., Д. Руес, К. Улрих, К. Василева, Л. Стаянов, Т. Вълев, Е. Михайлов, Н. Димитров. 2005. Абсолютни измервания и гравиметрична система на България. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 5-6, 10-17.
- Милев, Г., Г. Вълев, К. Василева, Е. Михайлов. 2008. Национална гравиметрична мрежа на България – *Геодезия, картография, земеустройство*, 5-6, 4-8.
- Ценков, Ц., Т. Беляшки, Е. Михайлов. 2011. Получаване на гравиметричните поправки по линии от държавната нивелация на Република България – *Доклад на XI международна научна конференция ВСУ “Любен Каравелов” от 2 до 3 юни 2011, София, Том II, VI-13-18.*