



Приета: 18.03.2016 г.
Преработена: 11.04.2016 г.
Одобрена: 22.04.2016 г.

СЪВРЕМЕННИ АСПЕКТИ НА ГЕОМЕТРИЧНАТА НИВЕЛАЦИЯ

Сл. Господинов¹, Е. Пенева², П. Пенев³, Т. Ламбева⁴, Ю. Цановски⁵,
С. Джорова⁶, Г. Маринов⁷, И. Радев⁸

Ключови думи: прецизна нивелация, прецизни нивелачни измервания, корекции към прецизните нивелачни измервания, височинни определения

РЕЗЮМЕ

В статията се дискутира реализирането на прецизните нивелачни измервания с оглед на използването на съвременни инструменти и в съответствие на световните изисквания, препоръки и стандарти, заложен в резолюциите на Международната асоциация по геодезия и при дефинирането на Европейската височинна референтна система и мрежа. Изтъква се необходимостта от съставяне на нови технически инструкции и задания за провеждане, обработка и оценка на прецизни нивелачни измервания, и задаване на цялостни насоки и препоръки за оптимизация на Държавната нивелачна мрежа.

¹ Славейко Господинов, проф. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: sgospodinov@mail.bg

² Елена Пенева, проф. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: peneva_el@yahoo.com

³ Пеньо Пенев, проф. д-р инж., кат. „Приложна геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: penevp_fgs@uacg.bg

⁴ Татяна Ламбева, гл. ас. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tlambeva16@gmail.com

⁵ Юри Цановски, гл. ас. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: yuuri@abv.bg

⁶ Северина Джорова, гл. ас. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: severina_djorova@abv.bg

⁷ Георги Маринов, гл. ас. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: gal_marinov@abv.bg

⁸ Ивайло Радев, ас. инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ivoradev_bg@abv.bg

1. Въведение

Дълго време, до 90-те години на миналия век, на прецизната нивелация се гледаше като на процес, най-малко подвластен на автоматизация. Счита се, че субективният фактор заема най-значимо място в тази основна геодезическа технология.

Постиженията на съвременната наука (теорията на разпознаване на изображения, компютърните технологии и др.) промениха изцяло утвърдилите се през годините схващания. Нещо повече, създадох се предпоставки за многоспектрално приложение на резултатите от прецизната нивелация, реализирана (посредством Държавната нивелачна мрежа) за целите на геодезията, геодинамиката, геофизиката, океанологията, хидрологията и други области, свързани с височинни определения.

Държавната нивелачна мрежа служи за основа на всички височинни измервания в Република България, както и за разпространение на единна височинна система на територията на цялата страна. Височинната система на България е част от Европейската височинна система (EVRS – European Vertical Reference System) спрямо действащата Наредба № 2 от 30 юли 2010 г., приета с Постановление на Министерския съвет № 153 от 29 юли 2010 година за „Въвеждане на Българска геодезическа система 2005“.

В процеса на извършване на съвременната високоточна геометрична нивелация все по-често възникват ситуации, при които изискванията за точност на резултатите от измерванията се намират на границата на техническите възможности на инструментите, а понякога и зад нея. Дългогодишната практика показва, че е твърде сложно да бъде достигната теоретично възможната точност, заради трудности, свързани с отчитане на влиянието на цял комплекс от външни смущаващи фактори. Характерът, особеностите и степента на въздействие на различните смущаващи фактори са изучени в различна степен. Именно поради това и заради липсата на необходимата техническа осигуреност за изследване на някои от гореизброените фактори, в настоящата статия се отделя специално внимание на влиянието на два от тези фактори – вертикалната рефракция и Лунно-Слънчевите приливи.

При провеждането и обработката на прецизни нивелачни измервания на линии от Държавната нивелачна мрежа се допускат множество неточности и грешки. Основните пропуски са свързани с: точността и начина на провеждане на съпътстващите измервания; множество грешки и концептуални несъответствия, свързани с обработката на измерванията: използване на формула за нормалната сила на тежестта при елипсоида „Хелмерт 1901 – 1909“, а не формула за нормалната сила на тежестта при елипсоида в Геодезическата референтна система 1980; ненанасяне на корекция за земните приливи в система „нулев прилив“; не еквивалентност на нормативно приетата със световната, конвенционална приливна система в момента; ненанасяне на корекция за вертикалната рефракция в приземния въздушен слой и др. Формулите, параметрите и необходимите измервания трябва да се изследват, обосноват и формулират спрямо съвременните резолюции и препоръки на Международната асоциация по геодезия (IAG – International Association of Geodesy).

В момента в България се разработва Наредба за Държавната нивелачна мрежа, в която се дават само рамките и предназначението на мрежата. За действителното ѝ изграждане и поддържане е необходима актуална Инструкция за прецизна нивелация. Действащата в момента „Инструкция за нивелация I и II клас“ от 1980 г. [2], изработена от ГУГК (Главно управление по геодезия и картография – в момента Агенция по геодезия, картография и кадастър – АГКК) е морално остаряла. Тя не включва създадената и използвана в практиката през последните 15 – 20 г. електронна измервателна и изчислителна техника и не може да послужи като нормативна основа при изграждането

и поддържането на Държавната нивелачна мрежа. Належачо е инструкцията да се актуализира с оглед на съвременните характеристики на прецизните нивелири и гравиметри, съвременните математически апарати и модели за обработка и оценка на измерванията и данните.

2. Обобщена схема за извършване на прецизна нивелация

За осъществяването на прецизна нивелация е необходимо реализиране, обработка и анализ на два типа измервания, разграничени като:

- **Основни – прецизни нивелачни измервания;**
- **Спомагателни или съпътстващи, каквито са:**
 - *Гравиметрични измервания по репери от нивелачната мрежа.*
 - *ГНСС измервания по репери от нивелачната мрежа.*
 - *Измервания на външни фактори – температура, налягане, влажност.*

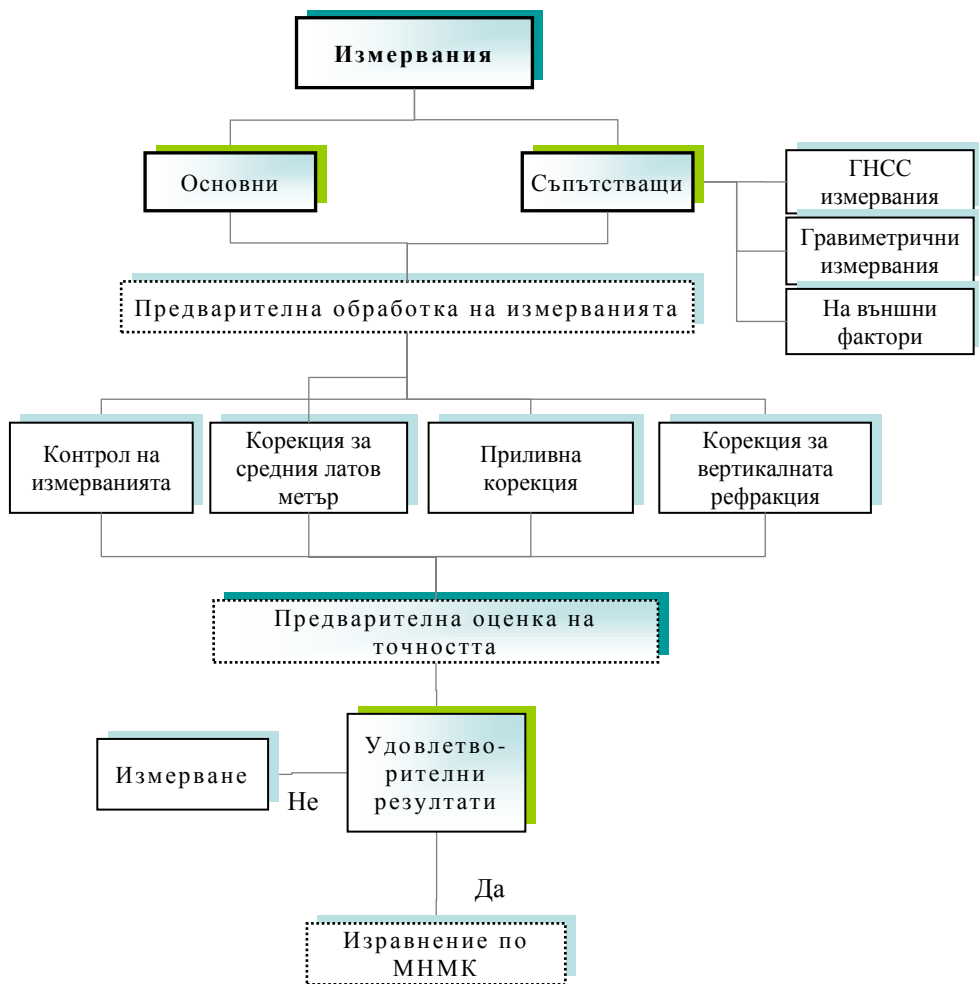


Фиг. 1. Измервания и обработка при извършване на прецизна нивелация

С развитието на технологиите **основните измервания** – прецизните нивелачни измервания – до известна степен бяха улеснени. Извършването им със съвременните дигитални нивелири даде възможност за съкращаване на времето за измерване и автоматизиран контрол на самите измервания по време на работа.

Извършването на **съпътстващи измервания** има за цел обезпечаване на обработката на основните измервания. Последните са необходими, както на нивелачните, така и на гравиметричните измервания.

На фиг. 1 е представен и систематизиран начинът и последователността на обработка на основните и спомагателните измервания – нанасяне на корекции към измерванията, преходите към различните системи до получаването на крайните продукти от обработка.



Фиг. 2. Етапи на обработка при извършване на прецизна нивелация

От особено значение е теоретичната обосновка и обусловеното представяне на корекциите, които се нанасят към различните видове измервания в етапа на тяхната предварителна обработка. Също така е съществено и трансформирането на измерванията и крайните продукти в необходимата гравиметрична, приливна и референтна система.

Обобщената схема (фиг. 2), представяща етапите за обработка на измервания от прецизна нивелация, е синтезиран преглед на съвременните световни изисквания към прецизните нивелачни измервания и мрежи, заложи в резолюциите на Международната асоциация по геодезия и при дефинирането на Европейската височинна референтна система и мрежа. Необходимо е унифицирането на изискванията и методите, касаещи прецизните нивелачни измервания със световните и Европейски стандарти, съставянето на технически инструкции и задания за провеждане, обработка и оценка на прецизни нивелачни измервания, и задаване на цялостни насоки и препоръки за оптимизация на Държавната нивелачна мрежа.

2.1. Нивелачни измервания

Основните измервания е необходимо да се извършват с помощта на високоточни дигитални нивелири и инварни лати, притежаващи определени качества.

Извършването на нивелачните измервания с такива инструменти значително намалява времето за работа – води до съкращаване на престоя във всяка станция от нивелачната линия, а оттам и до редуциране на различни видове грешки (потъване на лата, инструмент и др.).

По същество, основните принципи на измерване, обработката на резултатите от измерванията с използването на дигитални нивелири, не се отличават от тези, извършени с оптико-механични нивелири. Остават непроменени изискванията към условията на работа – атмосферни, изисквания за минимални и максимални отчети, минимална височина на визурата над терена, максимална дължина на визурата, режима (програмата) на измерване и т.н. Изискванията за контрол на измерванията в станциите, контролните изчисления на превишенията между два репера, са в съответствие на заложените в нормативната уредба.

Корекции към нивелачните измервания

Анализирани са необходимите корекции към нивелачните измервания, с оглед на съвременните изисквания за точност, както и съобразно възможностите на съвременните инструменти: корекция заради средния латов метър, корекция за влияние на вертикалната рефракция върху резултатите от високоточната геометрична нивелация, и корекция за влияние на Лунно-Слънчевите приливи върху резултатите от високоточните нивелачни измервания. Тук внимание ще бъде отделено на последните две.

Корекция заради влиянието на вертикалната рефракция

Влиянието на вертикалната рефракция има ясно изразен систематичен характер. Нейното влияние не се елиминира дори и при спазване на условието визурите „напред“ и „назад“ да са равни. През последните няколко десетилетия значението на въпроса за точното определяне на влиянието на нивелирната рефракция върху резултатите от нивелачните измервания нараства във връзка с геодезическите измервания за геодинамични цели.

Както е известно, съгласно действащата и в момента у нас „Инструкция за нивелация I и II клас“, върху резултатите от високоточните нивелачни измервания не се насаят корекции заради рефракционното влияние. В инструкцията е записано, че „... за отстраняване влиянието от кривината на земната повърхност и рефракцията, разстоянията от нивелира до латите (визурите) трябва да бъдат равни...“. Тази постановка далеч не отговаря на изискванията, като се имат предвид целите и точността на повторните

нивелачни измервания. Степента на влияние на рефракцията върху резултатите от геометричната нивелация зависи главно от вертикалния температурен градиент в приземния въздушен слой. Равенството на визуите „напред“ и „назад“ в общия случай не води до елиминирание на влиянието на нивелирната рефракция. Най-целесъобразно е за целта да се използват подходящи формули за изчисление на корекциите към резултатите от нивелачните измервания, базиращи се на данни за реалните метеорологични условия в съответния район. Определящ фактор при изчислението се явява температурната стратификация на въздуха.

За отчитане на това влияние, понастоящем има оформени два подхода. Първият се определя като *инструментален*, като при него рефракционният ъгъл се измерва директно, посредством прецизни рефрактометри. Уникалността на тази апаратура, нейната висока цена на сегашния етап, както и ниската ѝ мобилност, я правят все още трудно приложима.

Вторият подход е *методически*. Чрез него проблемите, свързани с влиянието на рефракцията, се решават в две направления. Първото направление има за цел разработването на методически прийоми за практическо елиминирание на влиянието на нивелирната рефракция в хода на самото измерване. Някои автори споменават за използването при съвременната високоточна нивелация на апаратура, позволяваща измерванията да се извършват посредством многоспектрален хоризонтален лъч, с цел елиминирание на влиянието на нивелирната рефракция. Второто направление на методическия подход се занимава с елиминирание на влиянието на рефракцията в процеса на обработка на резултатите от високоточните нивелачни измервания.

Счита се, че най-подходящата формула за определяне на корекцията δh , обусловена от влиянието на нивелачната рефракция е тази на *Кукамяки* [12], [1]:

$$\delta h = \text{ctg}^2 \tau \frac{\theta d \cdot 2^{c-1}}{(\sigma_3^c - \sigma_{\Pi}^c)} \left[\frac{1}{(c+1) \cdot 2^c} (\sigma_{\Pi}^{c+1} - \sigma_3^{c+1}) - Z_o^c (\sigma_{\Pi} - \sigma_3) \right], \quad (1)$$

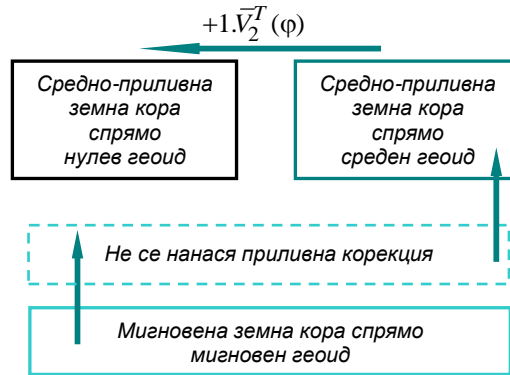
където τ е часов ъгъл; Z_o^c – височина на инструмента; c – неизвестни коефициенти, които се получават след решаване на система от три нелинейни уравнения [1]. σ_{Π} и σ_3 са намалените наполовина отчети по основната скала на „предната“ и „задната“ лата, d – коефициент, зависещ от температурата и атмосферното налягане.

При извършване на нивелация по наклонени трасета, визирните лъчи, идващи от нивелира до предната и задната лата, преминават на различна височина над почвата. Температурните градиенти при по-голяма височина по модул са по-малки, докато при по-малки височини са по-голям. Градиентите на температурата на пътищата на визирния лъч ще нарастват по модул при прехода от едната лата, където лъчът минава по-високо над почвата към другата, където лъчът преминава по-ниско. Разпределението на вертикалните температурни градиенти е закономерно при наклонени терени. Лъчът, който преминава по-ниско, винаги ще бъде повече изкривен, поради влиянието на рефракцията.

Приливна корекция към нивелачните измервания

Известно е, че за *основната част* от измерванията в Единна Европейска Нивелачна Мрежа (UELN – Unified European Leveling Network) [11], за целите на реализация на EVRF2007, преходът към нулева приливна система е извършен с известни приближения. При него динамичната компонента на приливния потенциал (директен и индиректен) е приета за нула, което в действителност не е така. По този начин е поставено равенство между мигновената земна кора спрямо мигновения геоид и средно-приливната земна

кора спрямо средния геоид. Така преходът до регламентираната в EVRS приливна система (средно-приливна земна кора спрямо нулев геоид) е осъществен единствено с нанасяне на корекция ($+1.\bar{V}_2^T(\varphi)$), премахваща постоянния, директен приливен ефект. Остава непремахната вариращата във времето компонента, указваща влияние върху нивелачните измервания. Използваният подход е представен на фиг. 3 [11].



Фиг. 3. Подход за нанасяне на приливната корекция към геопотенциалните коти, приложен за основната част от данните, при реализация EVRF 2007

При този използван подход е отстранен постоянният приливен ефект от геопотенциалните коти, но не е премахнат динамичният приливен ефект върху отделните измервания (гравиметрични и нивелачни, които на практика *се извършват по различно време*). Главната причина за това е, че е липсвала информация за моментите на измерване, за основната част от данните, участващи в UELN.

Необходимо е да бъде прецизиран механизмът на преминаване към приетата конвенционална приливна система (без значение дали тя ще е нулево-приливна (EVRS) или средно-приливна) (Резолюция 1 на IAG във връзка с дефинирането и реализацията на Международна вертикална референтна система (International Height Reference Systems – IHRS) [10], както и да бъде съобразен със следните изисквания:

1) *Коректност* – преходът към приетата приливна система да бъде най-напред с премахане на целия приливен ефект, т.е. преминаване към свободна от приливи система. Впоследствие е необходимо възстановяване на желаната постоянна (или постоянни) във времето компоненти за достигане до нулево-приливна или средно-приливна система;

2) *Целият* приливен ефект трябва да бъде премахнат по отделно от нивелачните и гравиметричните измервания, а върху крайния продукт от тях – геопотенциалните коти – да бъде възстановена постоянна компонента. За тази цел е необходимо осигуряване на данни за моментите на извършване на гравиметричните и на нивелачните измервания;

3) Прилагане на подходящ метод за изчисляване на приливната корекция към нивелачните измервания. Точността на корекцията трябва да е съобразена с точността на измерванията.

4) Прилагане на подходящ метод за изчисляване на приливната корекция към гравиметричните измервания. Точността на корекцията към тях трябва да съответства на зададената точност на геопотенциалните коти. Най-накрая, при възстановяване на постоянния приливен ефект, точността на последната корекция да съответства на отново на точността на геопотенциалните коти;

5) Редом с до тук поставените въпроси и изисквания остава проблемът, свързан с избора и/или извеждането на модел на еластична Земя, който е подходящ за територията на страната и който да бъде използван.

Авторите в [11] засягат проблема за съгласуване на приливните стандарти в EVRS с тези, дадени в Конвенциите на IERS [14]. Те подчертават, че е необходимо IERS стандартите да бъдат *адаптирани* за EVRS или друга височинна система. В тази връзка се изтъква, че за определянето на приливната корекция към нивелачните измервания използването на функцията на Грийн би било по-подходящо, а не детайлно разлагане на приливния потенциал, както е указано в Конвенциите на IERS.

Определянето на приливната корекция, с необходимата точност би могло да стане и чрез използване на т. нар. директни методи, какъвто е алгоритъмът на Лонгман.

Формулата за корекцията за пълния приливен ефект върху превишенията от геометрична нивелация има следния вид:

$$\delta h^{tide} = \gamma \Delta S \frac{g_{hor}^t}{g} \cos(A - \alpha), \quad (2)$$

където $\gamma = 1 + k - h$. Стойността на корекцията зависи от: разстоянието ΔS между латите; стойността на хоризонталната компонента на приливообразуващата сила g_{hor}^t на смущаващото тяло (с азимут A), по направление на визирната ос на нивелира (или по направление на азимута α на нивелачната линия); от числата на Лъв (k и h). g е ускорението на силата на тежестта.

За определянето на приливната корекция по формула (2) са необходими данни за момента на измерване, местоположението на станцията и направлението на нивелачния ход. Необходимата точност при определяне на момента и местоположението са дадени от [3], от което е видно че те могат да се получат чрез GNSS измерване, с навигационна точност, за всяка станция.

Определянето на хоризонталната компонента на приливообразуващата сила се извършва чрез [18]

$$g_{hor}^t = \frac{\partial V_T}{r \partial \theta}, \quad (3)$$

където V_T е приливният потенциал на смущаващото тяло, θ е геоцентричният ъгъл, заключен между направлението на точката от земната повърхност (станцията) и направлението на приливообразуващото тяло, а r е радиусът на вектора, свързващ станцията и масовия център на Земята. Формула (2) придобива вида:

$$\delta h^{tide} = \gamma \frac{\Delta S}{g} \frac{\partial V_T}{r \partial \theta} \cos(A - \alpha). \quad (4)$$

След заместване на развитието на V_T , за корекцията върху превишенията за приливния ефект, породен от Слънцето или Луната (M, S), следва [15]:

$$\delta h_{(M,S)}^{tide} = \frac{\gamma \Delta S}{g} \cos(A - \alpha) \left[\frac{3}{2} \frac{GM_{(M,S)} r}{\rho(t)^3} \sin 2\theta(t) + \frac{3}{2} \frac{GM_{(M,S)} r^2}{\rho(t)^4} (4 - 5 \sin^2 \theta(t)) \sin \theta(t) + \right. \\ \left. + \frac{5}{4} \frac{GM_{(M,S)} r^3}{\rho(t)^5} (4 - 7 \sin^2 \theta(t)) \sin 2\theta(t) \right], \quad (5)$$

където $\rho(t)$ е геоцентричното разстояние на смущаващото тяло, $GM_{(M,S)}$ е гравитационна константа на Слънцето и съответно на Луната.

За осигуряване на точност от 0,001 mm, при изчисляване на корекцията по формула (5) е необходимо [15] да се използва развитие на V_T до третия член за Луната (на полиномите на Лъожандър до 4-та степен), а за отразяване на влиянието на Слънцето е достатъчен вторият член.

За определянето на приливния ефект в нулева или средна приливна система е необходимо да се възстанови постоянният приливен ефект, съгласно формулите, дадени от [9].

Корекцията за определяне на нивелачното превишение, относно средния геоид, е (прибавя се):

$$\delta h_{mean}^{tide} = \frac{\Delta S}{g} \cos(A - \alpha) \left[\gamma \frac{\partial V_T}{r \partial \theta} - \gamma \frac{\partial \bar{V}_T}{r \partial \theta} \right], \quad (6)$$

където \bar{V}_T е постоянният приливен потенциал.

Корекцията за определяне на нивелачното превишение, относно нулевия геоид, е (прибавя се):

$$\delta h_{zero}^{tide} = \frac{\Delta S}{g} \cos(A - \alpha) \left[\gamma \frac{\partial V_T}{r \partial \theta} + (1 - \gamma) \frac{\partial \bar{V}_T}{r \partial \theta} \right]. \quad (7)$$

За възстановяване на постоянния, индиректен приливен ефект към *нормалните височини* в EVRS, при преминаване от средна към нулева приливна система, е използвана формулата (прибавя се) [11]:

$$H_2(\varphi) = +99,40 - 295,41 \sin^2 \varphi - 0,42 \sin^4 \varphi, \text{ mm}. \quad (8)$$

Трябва да се има предвид, че горната формула е с точност до 0,15 mm.

Освен стандартните данни, съдържащи се в нивелачния карнет, е необходимо да се съхраняват и данни за следните допълнителни измервания:

- *Отчети на температурата по двете лати – до десета от градус по Целзий;*
- *Атмосферно налягане – до десета от милибар;*
- *Приблизителни координати на нивелачната станция.*

Тези допълнителни данни са необходими за изчисляването на корекцията за вертикалната рефракция и приливната корекция.

2.2. Гравиметрични измервания

Гравиметричните измервания са основна част от прецизните нивелачни измервания. Необходимо е да се получат стойности за големините на силата на тежестта за възловите нивелачни репери по нивелачната линия, което предполага средно разстояние от 1 km. Стойностите за големините на силата на тежестта се ползват за изчисляване на разлики в геопотенциалните коти, за нанасяне на поправка за неуспоредност на ниво-повърхнините при изчисляване на нормалните превишения, за изчисляване на корекция за наклон на ниво-повърхнината по време на извършване на нивелачни измервания и др.

Гравиметричните измервания, контроли и обработки трябва да подsigурват точност от порядъка на II клас на Държавна гравиметрична мрежа – средната квадратна грешка на определянето на големината на силата на тежестта за всеки възлов нивелачен репер не трябва да надвишава стойността от $\pm 60 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$.

Подходящо е използването на съвременни инструменти за релативни гравиметрични измервания, като гравиметри Scintex CG5 или LaCoste&Romberg Model G/D, или аналогични по точност.

Схемата на релативните гравиметрични измервания е добре да бъде прост гравиметричен рейс, изхождащ от гравиметрична точка от Държавната гравиметрична мрежа (Еталонна гравиметрична мрежа), като схемите за тази цел трябва да са предварително проектирани за всеки ден.

Необходимите допълнителни измервания, за изчисляването на корекциите към гравиметричните измервания, са: ГНСС измервания, на атмосферното налягане, на температурата.

Корекции към гравиметричните измервания

Задължителните за внасяне корекции към релативните гравиметрични измервания са следните: приливна, за височината на инструмента, атмосферна и за дрейфа на нулата.

Съвременните електронни гравиметри имат възможност за автоматично определяне и нанасяне на приливната корекция към измерванията (Scintex CG5/CG3), с точност от $3 \mu\text{Gal}$, напълно достатъчна за измервания за целите на Второкласна гравиметрична мрежа.

Определянето на корекция за височината на инструмента става чрез използване на стойността на нормалния вертикален градиент ($VG(normal) = -0,3086 \text{ mGal/m}$), при условие, че няма данни за реалния вертикален градиент.

Атмосферната корекция отразява влиянието от промяната в атмосферното налягане за периода на измерване. Емпиричната формула за корекцията за атмосферно налягане има следния вид

$$\delta O_{pressure} = 0,3(p - p_n), \mu\text{Gal}, \quad (9)$$

където p е измерено налягане в hPa , а p_n е нормално атмосферно налягане в hPa , определено за стандартна атмосфера, изчислено с нормалната височина за Международна стандартна атмосфера (International standard Atmosphere – ISA). В резолюциите на IAG се препоръчва формула за нормална атмосфера DIN 5450.

Моделирането на корекцията за дрейфа на нулата е свързано със схемата на измерване. Възможно е нанасяне на линеен и квадратичен дрейф, като изборът на модел трябва да бъде обоснован.

2.3. ГНСС измервания

Значимостта на ГНСС определенията за реализацията и разпространението на височинната референтна система се обуславят от:

1. Необходимостта от данни за положението на точките от нивелачната линия за определяне на нормалната сила на тежестта върху елипсоида и средноинтегралната стойност на нормалната сила на тежестта – при изчисляване на гравиметричните корекции, при определяне на нормалните превишения. Третата конвенция от дефиницията на EVRS определя еквивалентността на нормалните височини с геопотенциалните

коти при условие, че референтното гравитационно поле е указано. При определяне на нормалните височини чрез геопотенциалните коти са необходими данни за нормалното гравитационно поле (GRS80), при което е необходима геодезическата ширина, определена в координатна система ETRS89. В случая е достатъчна точност от порядъка на $0,1''$ на ГНСС определенията за местоположението (B,L).

2. Резолюция 1 на IAG, във връзка с дефинирането и реализацията на Международна вертикална референтна система (IHRС). Точка 5 от решенията в нея гласи, че пространственото положение на мястото на точката, за която се определя геопотенциала $W_p = W(X)$, е свързано с координатите X в Международна Земна Референтна Система.

3. Необходимост от получаване на елипсоидните височини на точките във връзка с решаването на геодезически, инженерно-геодезически, научни и научно-практически задачи – определяне на геоида, определяне на вертикални движения на земната кора и скорости и др.

Определяне на геодезическата височина (Н) чрез ГНСС

През 2003 година Държавната нивелация I клас е привързана към EUVN чрез първата ѝ реализация EVRF2000. Задача на EUVN е създаването на хомогенна и унифицирана, кинематична височинна система за територията на Европа. Според Резолюция 2 от EUREF (Хелзинки 1995 г.) EUVN [8] се дефинира като част от EUREF (БГС 2005 също е част от EUREF) с допълнени точки от основни нивелачни репери и мареографни станции. Това е мрежа от перманентни ГНСС станции в рамките на EUREF (EPN – Euref Permanent Network), GPS станции в близост до мареографни станции, GPS точки, съвпадащи с възлови репери. Работна група към EUREF през 1999 година указва насоките за по-нататъшното развитие на височинната система EVRS. Групата е изследвала 80 перманентни станции от EPN, като установява денонощна повтораемост на вертикалната компонента в рамките на 7 – 9 mm. Имайки предвид задачата на EUVN да бъде кинематична вертикална система, тези резултати са обнадеждаващи. Това на практика означава, че за 3-годишен период на наблюдения би могло да се отчетат вертикални движения с точност:

$$m_{v_h} = m_h \sqrt{2} / \sqrt{365} = \pm 0,5 \text{ mm/y} . \quad (10)$$

От своя страна това означава, че за 3-годишен период на GNSS наблюдение би могло да бъде отчетено преместване от 1 mm/год.

От друга страна, прецизната геометрична нивелация би могла да отчете вертикално движение с точност:

$$m_{v_h} = \pm 0,07 \text{ mm.km}^{-1/2} / \text{y} . \quad (11)$$

При повтораемост на цикличните нивелачни измервания през 20 години, би могло да се заложи на постигане на необходимите точности чрез GNSS наблюдения, особено за големи нивелачни ходове (около 200 km) и да се твърди, че комбинацията от геометрична нивелация и GNSS определения е гаранция за създаването на стабилна кинематична вертикална референтна система.

Отчитайки възможностите на съвременните геодезически приемници и факта, че БГС2005 чрез реализацията си от I и II клас GPS мрежа е „пасивна“ (точността на GPS точките във височинно отношение за I клас е 10 mm, за II клас е 15 mm), се предлага определянето на геодезичните височини на реперите да бъде с точност до 20 mm (абсолютна точност). Тъй като за изходни точки при определяне на геодезическите височини

на реперите ще се използват точки от GPS мрежата, както и перманентни станции от сертифицирани инфраструктурни мрежи, които ще бъдат приети за „фиксиран“ при обработката, логично ще е относителната точност на геодезическите височини да бъде до 15 mm.

Тази точност ще осигури определянето на височинното преместване на реперите за период от 20 години (периода, заложен при преизмерване на нивелачната мрежа), имайки предвид изведените скорости между цикли III и II (в интервала от $-5,2$ до $+1,6$ mm/y) – за 20 години $\Delta H^{cp} = 68$ mm. Теоретично необходимата, абсолютна точност на височинните GNSS определения за установяване на вертикални премествания от този порядък е

$$m_{H_i} = \frac{\Delta H^{cp}}{t\sqrt{2}} \approx 24 \text{ mm}, \quad (12)$$

където t е параметър на разпределението на Стюдънт.

Предпоставки за осигуряване на изискваната точност:

За определяне на пространствените координати на реперите е необходимо да се спазват изискванията на Инструкция № РД-02-20-25 от 20 септември 2011 г. за определяне на геодезически точки с помощта на глобални навигационни спътникови системи. Тук трябва да се направят следните уточнения във връзка с прилагането на кинематичен режим за координирането на реперите:

– координатният регистър следва да съдържа данни за определянето на геодезическата височина на репера от *двукратно* му измерване от *различни* базови станции, както и осреднения резултат (в случай, че разликата от двукратните измервания не надвишава 10 mm);

– под работа в кинематичен режим в реално време (RTK) се има предвид единствено работа с потребителска референтна станция, а *не посредством виртуални станции* и продукти *предоставяни в реално време от инфраструктурни мрежи*.

Корекцията, която е необходимо да бъде нанесена върху ГНСС измерванията, е свързана с изискванията, поставени от дефиницията на Височинната система, част от БГС2005. БГС2005 е хармонизирана със стандартите, дейностите и продуктите на Европейската референтна система (EUREF) [4]. EVRS2007, респективно Височинната система на БГС2005, са в нулевоприливни системи в съответствие на резолюциите на IAG.

3. Изчисляване на геопотенциални коти и разлики

Препоръка на IAG е прецизните нивелачни мрежи да се реализират и обработват с геопотенциални превишения и коти. Геопотенциалните коти представляват идеалната височинна система – еднозначни са, не зависят от пътя на нивелиране и реално отразяват превишението между реперите. Недостатъкът им е, че не са в линейни мерни единици. Те са идеална основа за преминаване към избрана система – нормални, динамични или ортометрични височини.

Изчислените геопотенциални коти е необходимо да бъдат определени в нормативно указаната приливна система. Ако гравиметричните и нивелачните измервания са приведени в „неприливна“ система, и определените геопотенциални коти са в същата сис-

тема. За привеждането им към средна или нулево приливна система е необходимо внасяне на корекция за постоянния приливен ефект. За трансформирането им в БГС 2005 се използва формулата, прилагана за EVRS2007 [11]:

$$W_2(\varphi, h) = (1 + 0,31 \times 10^{-6} m^{-1} h)(0,9722 - 2,8841 \sin^2 \varphi - 0,0195 \sin^4 \varphi), \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}, \quad (13)$$

където h е елипсоидната височина. Точността на изчислената корекция по формулата е $0,001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

4. Заключение

Предлага се обновяване и ново структуриране на нормативната уредба за прецизна нивелация, с оглед на съвременните инструменти, необходими за провеждане на прецизна нивелация, както и необходимите обработки и корекции към тях. Направените препоръки и заключения са следните:

- Необходимо е актуализиране на инструкцията за прецизна нивелация, с оглед на съвременните инструменти за прецизни нивелачни измервания и съвременните изисквания за точност.

- Препоръчва се внасяне на редукция за вертикалната рефракция. За нейното изчисляване са дефинирани необходимите съпътстващи измервания и математически апарат.

- Препоръчва се внасяне на редукция за приливния ефект към измерванията (превишения, големини на силата на тежестта и GNSS измервания) с оглед на това, че същият не е пренебрежимо малък и има систематичен характер. Анализирани са подходи за нанасяне на приливната корекция върху измерените величини – повишения и ускорения на силата на тежестта и върху продуктите от тях геопотенциални коти и нормални повишения.

- По дефиниция всяка от трите приливни системи не съдържа периодични компоненти. Без значение към коя от тях (средна приливна за IHR5, нулево-приливна за EVRS 2007) ще бъдат отнесени измерванията, прилаганият принцип е един: премахване на целия приливен ефект и възстановяване напълно или отчасти на постоянните приливни компоненти, т.е. за коректното реализиране на прехода към дадена приливна система е необходимо изчисляване на целия приливен ефект, както и осигуряване на данни за това (момент на измерване, местоположение и др.). Поради тази причина се препоръчва да се извършват позиционни определения с навигационен GNSS приемник за регистриране на местоположение и момент на измерване по време на нивелация.

- GNSS измерванията дават възможност за определяне на вертикалните премествания на реперите от ДНМ с по-голяма честота (през 10 г.) отколкото нивелачните (през 20 г.) за тази цел. GNSS измерванията са по-целесъобразни икономически.

- Определените геодезически височини с точност 20 mm ще послужат за създаването на детайлен модел на квазигеоида на ниво 5 cm и по-добро въз основа на метода GPS/Нивелация.

- Нивелачните репери (с оглед гъстотата им) могат да се използват като изходни не само по височина, а и по положение за всякакви практически задачи, тъй като на практика представляват съгъстяване на БГС2005.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-177/2015 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Господинов, Сл.* Основни геодезически мрежи за геодинамични цели. Дисертация, УАСГ, София, 1990.
2. *ГУГКК.* Инструкция за нивелация I и II клас. София, 1980.
3. *Жеков, Д., Здравчев, И., Господинов, Сл.* Отчитане влиянието на Лунно-Слънчевите приливи върху резултатите от високоточни нивелачни измервания в НРБ. Геодезия, картография, земеустройство, бр. 1, стр. 18 – 20, 1989.
4. *МРРБ.* Инструкция № РД-02-20-12 от 3 август 2012 г. за преобразуване на съществуващите геодезически и картографски материали и данни в „Българска геодезическа система 2005“. 2012.
5. *МРРБ.* Наредба № 2 от 30 юли 2010 г. за дефиниране, реализация и поддържане на Българската геодезическа система. 2010.
6. *МРРБ.* Наредба № РД-02-21-1 от 9 юли 2015 г. за Държавната нивелачна мрежа. 2015.
7. *International Association of Geodesy (IAG).* IAG Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRIS), General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Prague, July 2015, 1990.
8. *Adam, J., Augath, W., Brouwer, F., Engelhardt, G., Gurtner, W., Harsson, B. G., Ihde, J., Ineichen, D., Lang, H., Luthardt, J., Sacher, M., Schlüter, W., Springer, T., Wöppelmann, G.* Status and Development of the European Height Systems. Geodesy Beyond 2000: The Challenges of the First Decade, IAG General Assembly Birmingham July 19 – 30, Springer, 1999.
9. *Ekman, M.* Impacts of Geodynamic Phenomena on Systems for Height and Gravity. Bull. Geod. 63, pp. 281 – 296, 1989.
10. *Ihde, J., Barzaghi, R., Marti, U., Sánchez, L., Sideris, M., Drewes, H., Foerste, Ch., Gruber, T., Liebsch, G., Pail, R.* Report of the Ad-hoc Group on an International Height Reference System (IHRIS). In: IAG Reports 2011 – 2015 (Travaux de l’AIG Vol. 39), <http://iag.dgfi.tum.de/index.php?id=329>.
11. *Ihde, J., Mäkinen, J., Sacher, M.* Conventions for the Definition and Realization of a European Vertical Reference System (EVRS) – EVRS. Conventions 2007, IAG Sub-commission 1.3a EUREF, EVRS Conventions V5.1, 2008.
12. *Kukkamäki, T. J.* Über die nivellitische Refraktion. Helsinki, 1938.
13. *Mäkinen, J.* The treatment of the permanent tide in EUREF products. EUREF 2008, Brussels, 17 – 28 June, 2008.
14. *Petit, G., Luzum, B.* IERS Conventions (2010), IERS Technical Note No. 36, IERS Conventions Centre, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), US Naval Observatory (USNO), Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main, 2010.
15. *Popovas, D.* Estimation of lunosolar correction in precise leveling, Environmental Engineering. 8th International Conference, May 19 – 20, 2011, Vilnius, Lithuania, 2011.
16. *Poutanen, M., Vermeer, M., Mäkinen, J.* The permanent tide in GPS positioning. J. of Geodesy, 70:499 – 504, 1996.

17. *Vaniček, P.* The Earth Tides. Lecture Notes №36, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada, 1973.

18. *Vaniček, P.* Tidal Corrections to Geodetic Quantities. NOAA Technical report NOS 83 NGS 14, US Department of Commerce, 1980.

CONTEMPORARY ASPECTS TO PRECISE LEVELLING

**S. Gospodinov¹, E. Peneva², P. Penev³, T. Lambeva⁴, Y. Tzanovski⁵,
S. Djorova⁶, G. Marinov⁷, I. Radev⁸**

Keywords: precise levelling, precise levelling measurements, precise levelling corrections, height determinations

ABSTRACT

The implementation of precise levelling measurements with a view to the use of modern instruments and according to international requirements, recommendations and standards adopted in the International Association of Geodesy resolutions are discussed in the paper. These issues are also relevant to the definition and realization of the European Vertical Reference System and Network. The necessity to develop new technical instructions and assignments for realization, processing and estimation of precise levelling measurements as well as a set of comprehensive guidelines and recommendations for optimization of the State Levelling Network is highlighted.

¹ Slaveyko Gospodinov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: sgospodinov@mail.bg

² Elena Peneva, Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: peneva_el@yahoo.com

³ Penio Penev, Prof. Dr. Eng., Dept. "Applied Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: penevp_fgs@uacg.bg

⁴ Tatyana Lambeva, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: tlambeva16@gmail.com

⁵ Yuri Tzanovski, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: yuuri@abv.bg

⁶ Severina Djorova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: severina_djorova@abv.bg

⁷ Georgi Marinov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: gal_marinov@abv.bg

⁸ Ivaylo Radev, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ivoradev_bg@abv.bg

