

GRAVITY MEASUREMENTS AS A METHOD FOR STUDYING ARCHAEOLOGICAL SITES. POSSIBILITIES FOR THEIR APPLICATION IN BULGARIA

Todor Todorov

University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“, 1700 Sofia; E-mail: todorov@pentod.com

ABSTRACT. Geophysical research has long been used in the study of archaeological sites. This helps to plan excavations more accurately, reduce costs, and protect underground structures from damage. Electroresistance, geomagnetic, and georadar methods have been established and are most often used. Each of them has different possibilities and areas of application, and alone or in combination with each other, they give good results. But in the presence of small underground cavities, especially in combination with other external interfering factors, such as the presence of concrete flooring, iron reinforcement, electrical cables, and others, their effectiveness is greatly reduced. In this case, the application of gravimetric measurements would provide far more accurate information. Although this method has been in use since the 1960s to locate mines and caves, its employment in archaeology became possible in the early 21st century with the invention of sensitive microgravimeters. This need is imposed by the fact that the gravitational anomalies created by these objects are within a few tens of microgals. This report presents the possibilities of this type of research based on foreign experience, while also examining the conditions for its implementation in Bulgaria.

Key words: archaeological research, microgravimetry, geophysical methods

ГРАВИТАЦИОННИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ КАТО МЕТОД ЗА ПРОУЧВАНЕ НА АРХЕОЛОГИЧЕСКИ ОБЕКТИ. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПРИЛАГАНЕТО ИМ В БЪЛГАРИЯ

Todor Todorov

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Геофизичните изследвания отдавна се прилагат при проучване на археологически обекти. Това спомага за по точно планиране на разкопките, намаляване на разходите и запазване на подземните структури от увреждане. Утвърдени и най-често използвани са електросъпротивителните, геомагнитните и георадарните методи. Всеки от тях има различни възможности и области на приложение, като самостоятелно или в комбинация помежду си те дават добри резултати. Но при наличие на малки по обем подземни кухини особено в съвкупност с други външни смущаващи фактори, като наличие на бетонни настилки, желязна арматура, електрически кабели и др. тяхната ефективност силно намалява. В случая прилагането на гравиметрични измервания биха дали много по точна информация. Макар и този метод да се използва още от 60 години на XX век за локализиране на минни изработки и пещери, употребата му в археологията става възможна в началото на XXI век с изобретяването на чувствителни микрогравиметри. Тази необходимост е наложена от факта, че гравитационните аномалии, които създават тези обекти, са в границите на няколко десетки микрогала. В този доклад са представени възможностите на този вид проучвания на база на чуждестранния опит, като същевременно са разгледани и условията за прилагането му и в България.

Ключови думи: археологически проучвания, микрогравиметрия, геофизични методи

Въведение

Методите за проучване на археологически обекти се разделят на два вида деструктивни и недеструктивни. Археологическите разкопки спадат към първия тип и са тези, които дават най-точна представа за обекта. Но при провеждането им, особено в последните години със масовото използване на земекопна техника, много често се нанасят непоправими щети върху движимото и недвижимо културно-историческо наследство. Именно по тази причина се е наложило предварителното проучване на погребаните структури с помощта на различни геофизични методи. Тези изследвания се провеждат от въздуха, морската повърхност или на земята, като по никакъв начин не влияят върху обектите, но в същото време ни дават много точна представа за тях. Принципите на тези проучвания се основават на измерване на естествени или изкуствено

създадени физични полета. Те могат да бъдат гравиметрични, геомагнитни, геоелектрични, геотермични, радиометрични и др. Изборът им зависи от вида на изследваните обекти, състава и структурата на почвата или скалите.

Най-масово приложение са намерили измерванията с магнитометри, електросъпротивителните, георадарните проучвания и металдетектинга. Това се дължи предимно на по-ниската стойност на самото оборудване, както и на технологичните особености на самите методи.

Използването на гравиметричните измервания за проучване на археологически обекти практически стават възможни в края на XX и началото на XXI век. По тази причина публикациите на тази тема не са много, но въпреки това дават представа за предимствата на метода и тенденциите за неговото развитие.

Гравиметрични измервания в археологията

Локализирането на кухни под земната повърхност е класическа гравиметрична задача. За първи път методът намира широко приложение в проучване на карстови райони. Поради спецификата на тези скали образуването на различни по форма и размери подземни образувания е често срещано явление. Наличието им променя устойчивостта на терена и създава проблеми при строителство на различни обекти. Първите сериозни проучвания в тази насока започват през 60-те години на XX век. В следващите години методът се усъвършенства (Chalikakis, 2011), а гравиметрията започва да се утвърждава като основен начин за локализирането на природни образувания, а също и на изоставени тунели, бункери, крипти и други подземни обекти, както и за изследвания в областта на геодинамиката.

С въвеждане на новите прецизни позициониращи системи, позволяващи точност до няколко сантиметра, нараства ролята на въздушната и спътникова гравиметрия. Но независимо от това, когато става въпрос за малки обекти създаващи незначителни аномалии на гравитационното поле наземния метод на изследване е незаменим.

Използването на гравиметрията в археологията става възможно благодарение на техническия прогрес и най-вече на разработването на високо чувствителни и лесни за използване автоматизирани микрогравиметри. Това е от особено значение поради малките размери на изследваните обекти. Този процес отнема доста дълго време като се има предвид, че първите уреди, подходящи за обследване на подземни кухни с точност 0,005 mGal започват да се произвеждат през 1959 г., като до края на века подобренията са по-скоро в областта на автоматизацията и начина на работа, но не и на точността. За качествен скок може да се говори след 2002 г., когато е разработен и пуснат на пазара от фирмата La Coste & Romberg – Scintrex уредът Scintrex CG-5 с чувствителност 0,001 mGal напълно автоматизиран, позволяващ връзка с външни устройства като GPS, компютър и др.

Терминът микрогравиметрия, наложил се в практиката, не е свързан с никакви нови принципи на измерване, а по-скоро с прецизността и възможността на апаратурата да отчита колебания на земното гравитационно поле в рамките на микрогалове ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{m/s}^2$).

Макар и не много сполучлив, опитът на Linnington (1966) за гравиметрично проучване на етруската гробница в град Черветери, Италия, може да се счита за първото приложение на този вид изследвания в проучването на древни паметници на културата.

Един от най-ранните факти за успешното приложение на микрогравитационните измервания в археологията можем да намерим в Blizkovsky (1979). При измервания в църквата св. Вацлав в град Товачов (Чешка република) е отчетена аномалия на Буге и е изказано предположение за наличие на подземна крипта. Това се потвърждава след като са направени разкопки и са открити няколко погребения.

През 1987 г. след гравитационни измервания вътре в Хеопсовата пирамида в Египет са открити неизвестни до тогава помещения пълни с пясък (Lakshmanan and Montlucon 1987).

Методът е използван също за откриване на подземни структури и резервоари за вода под църквата Света София в Истанбул (Friedrich et al. 1996).

След появата на новите по-чувствителни гравиметри (0,001 mGal) този вид проучвания, свързани с археологията, се увеличават. Като цяло те са насочени за търсене на скрити подземни основно кухи структури в исторически сгради, най-вече църкви и манастири.

Като по-интересни могат да се посочат резултатите постигнати от Abad (2007), Panisova and Pasteka (2009), Barton et al. (2011).

Независимо, че методът се използва основно за локализиране на кухни в района на сгради, той може да се прилага и за откриване на погребани подземни структури и за допроучване на известни вече такива.

В публикацията на Ismail et al. (2018) е описано изследването на археологически обект в Индонезия, погребан под 1,5 m пясък и почва. Направената мрежа през 2 m между точките на измерване покрива равномерно целия обект в случая предварително определен по останките под форма на могила. На определени места са отчетени положителни аномалии между 0,02-0,08 mGal/m. Формата е правилна и наподобява стени на сгради. След разкопки в южната част на района това предположение се потвърждава.

Най-обстойното изследване на възможността за проучване на археологически обекти с методите на микрогравитацията е направено от израелски учени. Обобщените резултати са дадени от Erpelbaum (2009).

Видовете останки са класифицирани и според възможността им за проучване са подредени в низходящ ред по следния начин:

- (1) Подземни древни кухни и галерии.
- (2) Стени, останки от храмове, църкви и различни масивни конструкции.
- (3) Настилки и гробници.
- (4) Римски акведукти (при благоприятна физико-геоложка среда).
- (5) Зони на древна примитивна металургична дейност (включително пещи - при благоприятна физико геоложка среда).

Направено е заключение, че подходящи за този вид проучване са 20-25 % от археологическите обекти в Израел (Erpelbaum, 2009).

Като се вземат предвид и останалите фактори, влияещи на този вид изследвания (вид на почвите и скалите, наклон или неравности на терена и др.) може да се направи заключението, че възможностите на метода са силно ограничени когато това касае локализирането на археологически обекти. Доста по-дългото време, необходимо за проучването, в сравнение с другите геофизични методи също не е за пренебрегване.

Най-добре неговата ефективност може да бъде оценена когато става въпрос за проучване на вече разкрити археологически структури и затова той се използва основно за откриване на подземни кухни в сгради.

По тази причина описаните по надолу казуси касаят този случай на база на научни публикации по темата.

Методология на измерванията

Гравиметричните измервания, свързани с археологически проучвания, макар и използващи стандартите на класическата гравиметрия имат някои особености, касаещи най-вече тяхната прецизност.

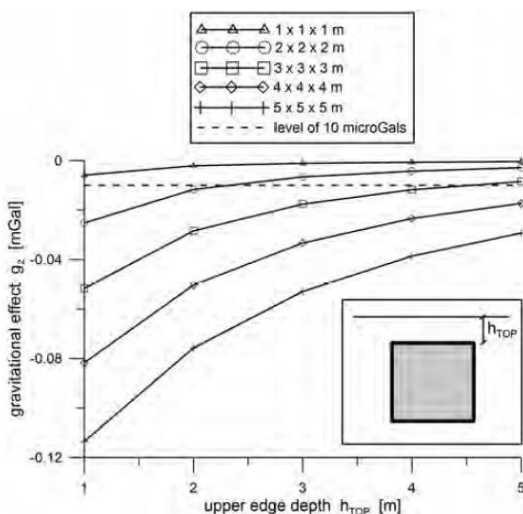
Това от своя страна налага съобразяването с множество фактори, които биха могли да им повлияят и да доведат до грешен краен резултат.

При самото измерване, данните за гравитацията, които събираме, са относителни и тяхното привързване и сравняване става към определена точка на измерване в обекта, като станцията, разположена на нея, се смята за базова. Първичните резултати от измерванията подлежат на последваща обработка и интерпретиране, което е от съществено значение за самото проучване.

Кухите подземни обекти в общия случай пораждат отрицателни аномалии на гравитационното поле. Като изключение може да се разглежда казусът със срутила се гробница. Запълването ѝ с материал от градежа, имащ по-висока плътност от заобикалящия го терен, би породило положителна аномалия според Bishop et al. (1997).

Най-голямо изменение на гравитацията се отчита при запълнени с въздух кухни. Същият обект, пълен с вода, поражда 60% от горния резултат а при запълване с кал – 40% (Owen, 1983 г.). В някои случаи се получават аномалии с по-голяма площ, достигаща два и повече диаметъра на обекта, дължащи се на нарушената структура на околната скала (Bishop et al., 1997).

Размерите на кухините са от основно значение за тяхното локализиране. При този вид измервания отрицателните гравитационни аномалии в границите на 20÷80 μGal се смятат за типични и могат да послужат за доста точно локализиране на стандартни крипти с размери 20-30 m^3 на дълбочина 1 метър. На база практически измервания от Pasteka R. et al. (2020) е установена зависимостта между размерите на 3D правоъгълна призма, пълна с въздух, (диференциалната плътност на модела е 2000 kg/m^3) и стойностите на отрицателната аномалия, които се отчитат (Фиг. 1). С пунктираната линия отбелязана границата от 10 μGal , под която обектите практически не могат да бъдат локализирани.



Фиг. 1. Зависимост между размера на обекта и гравитационния ефект (Pasteka R. et al., 2020)

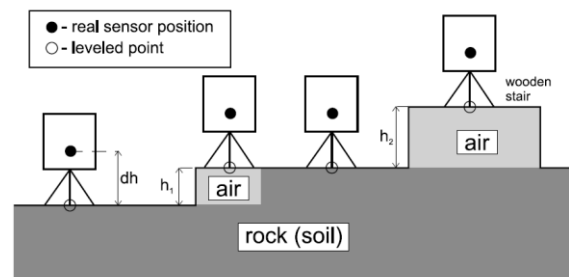
Определяне точките на измерванията

Определянето на точките на измерване е съобразено със свободното пространство на сградите, което в повечето случаи е ограничено от архитектурни елементи.

В същото време според Pasteka R. et al. (2020) има „неписано правило“ да не се прави измерване на 15-20cm от стените за да се избегне ефекта на сградата.

Географската височина на точката на измерване се определя с помощта на оптически нивелир или тотална станция с точност $\text{min} \pm 1\text{cm}$.

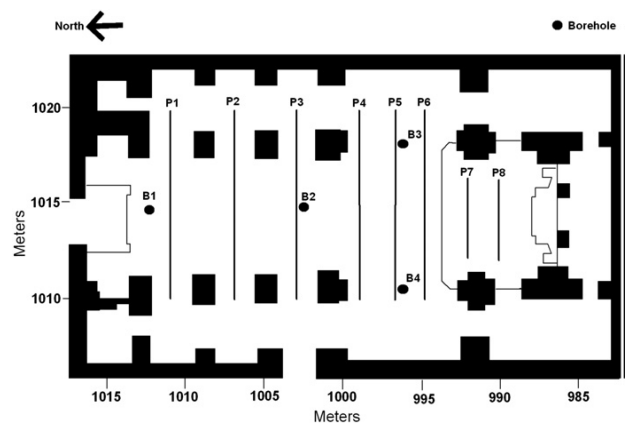
За по-голяма прецизност (Panisova and Pasteka, 2009) препоръчват изчисленията да се правят на база височината на реалното разположение на сензора вътре в уреда, използван за измерване. Разстоянието от долния ръб е даден от производителя. Височината на измерване се получава като към точката на разполагане на гравиметъра добавим d_h (Фиг. 2).



Фиг. 2. Схема на точките на измерване и реалното разположение на сензора (Panisova and Pasteka, 2009)

Тук може да се отбележи, че дори височините на двете дървени стълби h_1 и h_2 съответно 19 и 33 cm са отбелязани като запълнени с въздух и това е взето предвид при по-късното интерпретиране на получените показания. При това проучване са направени 111 измервания в площ с размери 10m x 20m. Отстоянията между точките е 1m като на места е по-малко поради наличие на препятствия.

Друг пример за разполагане на точките на измерване може да видим в Padin et al. (2012). Търсена е подземна крипта в църква във Валенсия Испания. Извършени са 51 измервания по осем профила P₁-P₈. По профили P₄-P₈, където се е очаквало да е криптата, измерванията са през 1m. По станалите профили са през 2m. За да се елиминира влиянието на външните стени, които са дебели 1m, най-близките измервания са на 2m от тях (Фиг. 3).



Фиг. 3. Схема на църквата с профилите на измерване (Padin et al., 2012)

Въвеждане на поправки на измерването

От съществено значение за всяко едно проучване е получените данни от измерванията да бъдат коректни, като в случая и най-малките грешки биха довели до грешно заключение.

Изборът на подходяща апаратура и стриктното спазване на указанията за работа с нея е първото, което трябва да се направи. Чувствителността от $1\mu\text{Gal}$ на гравиметъра се е наложила като стандарт при този вид измервания.

Върху резултатите на измерванията оказват влияние множество фактори, като някои от тях са свързани със самата апаратура, а други са повлияни от природните закони. За да се гарантира достоверността на измерванията е необходимо към първичните данни да бъдат въведени различни видове корекции (поправки). Като краен резултат се получава пълната аномалия на Буге.

Поправка на земните приливи. Тази аномалия, дължаща се на въздействието на Слънцето и Луната върху земята, може да предизвика отклонения на гравитационното поле, достигащо до $250\mu\text{Gal}$. Amarante and Trabanco (2016) имат подробна публикация по темата, но изчисляването му не е необходимо да се прави, като стойностите могат да се вземат от Wenzel (1999).

Поправка на свободен въздух (аномалия Фай). С отдалечаване от повърхността на земния геоид силата на земното притегляне намалява. Тази поправка отразява стойността му на дадена географска височина като се приема, че този слой е запълнен само с въздух. Въвеждането на тази поправка може да се разглежда и като пренасяне на нормалната стойност на силата на тежестта от морското равнище в точката на измерване. Теоретично приетата стойност за тази поправка е $0,3086\text{mGal/m}$ според Добрев и Ставрев (1977).

Поправка на атмосферното налягане. Тази корекция се използва, за да отрази разликата между нормалното атмосферно налягане и това, в момента на измерването. Международната асоциация по геодезия (IAG) с резолюция №9 препоръчва използването на следните формули за корекция на гравитацията в зависимост от атмосферното налягане (1).

$$dg_p = 0.30(P_i - P_{in})\mu\text{Gal} \quad (1)$$

$$P_{in} = 1013.25 \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15}\right)^{5.2559},$$

където H е надморската височина; P_i е измереното атмосферно налягане, а P_{in} – нормалното атмосферно налягане, като и двете са в hPa (Torge, 1989).

Поправка на географската ширина. Сферичната форма и въртенето на земята пораждат различни стойности на гравитацията в зависимост от географската ширина. При този вид проучвания, касаещи малки площи, може да се използва относителното изменение на силата на тежестта между различните точки на измерване като се приравнят към някаква базова станция наблизо. Средният хоризонтален градиент на тази поправка е $0,8128\text{ mGal/km}$,

или 1mGal на $1230,31\text{m}$. Макар и да изглежда незначително малко, за обект с дължина 50m разликата между двете крайни точки ако не се въведе тази поправка е повече от $60\mu\text{Gal}$, което би повлияло сериозно на крайния резултат (Padin et al., (2012).

Поправка на инструменталния дрейф. Съвременните микрогравиметри са изключително прецизни уреди. Независимо, че се полагат усилия за тяхната температурна и сеизмична стабилност, в течение на времето те променят своите показания при измерване на една и съща точка. Този ефект е известен и като дрейф на нулата. Неговата средна стойност може да се установи като се направят няколко контролни измервания през 1 или 2h в рамките на деня. Така може да се построи крива на дрейфа, която да служи за последващи корекции (Saibi, 2018).

Поправка на Буге. При изчисляване аномалията на Фай приемаме хипотетичен вариант, при който между точката на измерване и морското равнище има само въздух. Практически това е невъзможно при измервания на земната повърхност и този междинен слой реално е запълнен със скали с различна плътност. Известен е още и като „плоча на Буге“ и неговото гравитационно въздействие може да се изчисли по формула (2).

$$\Delta_2 g = 2G\rho h = 0.0419\rho h \text{ mGal}, \quad (2)$$

където:

G – гравитационна константа;

ρ [g/cm^3] – средна плътност на скалите в слоя;

h – дебелина на слоя в метри

Стойността на поправката на Буге получаваме като към горната формула прибавим стойността на поправката за свободен въздух – аномалия Фай. (3)

$$dg = \pm(308.6 - 41.91\rho)\Delta h \mu\text{Gal} \quad (3)$$

Тази аномалия е с положителен знак когато точката на измерване е над морското равнище и с отрицателен – когато е под него.

Корекция на теренния ефект. Влиянието на терена при полеви условия би представлявало проблем, когато те се провеждат на склон в близост до планина или долина. В градски условия е необходимо да се вземе предвид влиянието на околните сгради.

От една страна, това е самата сграда, в която се прави проучването. Както е отбелязана от Pasteka R. et al. (2020) и Padin et al. (2012) точките на измерване трябва да са на разстояние от външните стени. За околните сгради според тяхната форма (паралелепипед, куб, цилиндър и др) може да се изчисли обема, а от там и теглото, за да се предвиди тяхното въздействие. Материали по темата има в Radogna et al. (2003).

Приложените по-горе формули за различните поправки са доста обобщени. За прецизни изчисления подобни формули могат да се намерят в Hinze et. Al (2005). В същото време в практиката се е наложило използването и на специализиран софтуер.

Изчисляване на стойностите на гравитацията в точките на измерване

След като бъдат приложени всички корекции към резултата на измерването се получава стойността на аномалията на Буге във всяка точка. Окончателната остатъчна стойност, която ни е необходима, се получава като извадим получения резултат от показанията на базовата станция (4) (Padin et al., 2012).

$$\Delta g_b = g_b - g_{base} \quad (4)$$

Интерпретиране на данните от проучването

Според Saibi (2018) се използват основно три способа за интерпретиране на гравитационния градиент:

1. Изчисляване на производните на гравитационния градиент.

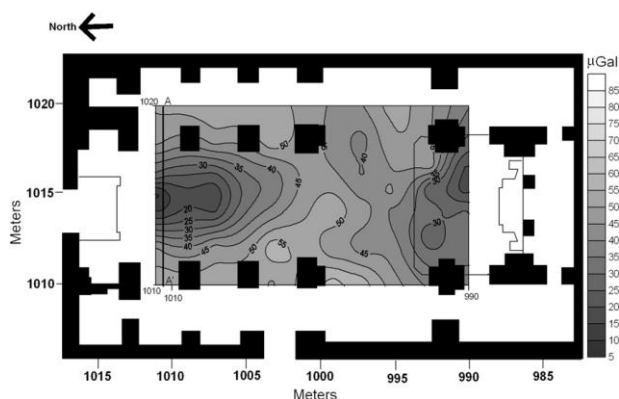
2. Предварително моделиране на гравитационни данни и получаване на модели, които се сравняват с получените при измерванията.

3. Инверсия на гравитационните данни в 2D и 3D модели със специализиран софтуер.

В Erpelbaum (2009) е описано приложението за 3D моделиране и е направен разширен анализ на гравитационните аномалии за оценка на интензитета на полето. Вторите и третите производни на гравитационния потенциал са изчислени за по-добра разделителна способност.

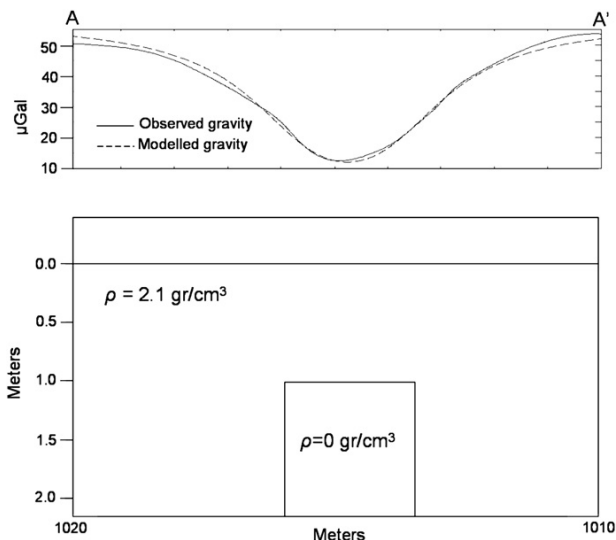
Подчертава се, че физическото измерване на производните на вертикалната гравитация в археологическото проучване има голямо значение и не може да бъде заменено с никаква последваща трансформация.

Padin et al. (2012), вземайки предвид малката площ на обекта и ниските стойности на аномалиите, използват полином от първа степен за локално регионално разделяне на гравитационното поле. С получената по този начин равнина се редуцират данните за аномалиите и се получава тяхното преразпределение и окончателните локални остатъчни аномалии на Буге (Фиг. 4).



Фиг. 4. Окончателните локални остатъчни аномалии на Буге. Padin et al. (2012)

С помощта на софтуера Grav-Modeler е извършена 2D инверсия на данни по сечението A-A' (Фиг. 5).



Фиг. 5. Микрогравиметрично моделирана инверсия по напречното сечение AA' Padin et al. (2012)

В резултат се получава правоъгълник с размери 2,5m и 1.2m на дълбочина 1m с нулева плътност. Това отговаря като размер и характеристики на крипта (Padin et al., 2012).

Panisova and Pasteka (2009) следват подобен подход като за окончателните изчисления на локалните аномалии използват софтуера Surfer. При тях инверсията е в 3D, като крайният резултат недвусмислено показва наличие на подземна кухня с размери даващи основание да се заключи, че това е крипта.

Апаратура

Основните изисквания към използваните гравиметри е тяхната чувствителност и надеждност. На пазара конкуренция за такива уреди почти липсва, след като през 2001 г. двете най-големи компании в бранша се сливат и днес 90% от всички гравиметри в световен мащаб са с марката LaCoste & Romberg – Scintrex.

След пускането на пазара през 2002 г. на техния CG-5 Autograv™ Gravity Meter дълги години той е най-масовият използван уред за целите на микрогравиметрията (Фиг. 6).



Фиг. 6. CG-5 Autograv™ (Scintrex Ltd. 2012).

Поради тази причина по-долу ще разгледаме неговите характеристики съгласно ръководството за употреба на производителя Scintrex Ltd. (2012).

CG-5 Autograv е микропроцесорно автоматизиран гравиметър, който има обхват на измерване от над 8000 mGal без нулиране и разделителна способност от 0,001 mGal. Измервания се извършват чрез натискане на бутон и при повечето условия отнема под една минута, за да завърши отчитането. Поредица от показания на гравитационните измервания могат да бъдат извършени чрез настройването му в режим на автоматичен запис и това става на всеки 6 секунди. Показания се визуализират на екрана директно в mGal, а данните се съхраняват във Flash памет и могат да се изпратят на принтер, модем, рекордер или компютър. Сензорният елемент е разположен в термо стабилизирана вакуумна камера, което му осигурява стабилна работа при температура на околната среда от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Същият е изработен от кварц и го прави устойчив на въздействия на магнитни полета със сила до $\pm 0,5\text{mT}$ (което е десет пъти над нормалното магнитно поле на земята). Дрейфът е допълнително софтуерно коригиран и не надхвърля 0,02mGal на ден.

Към уреда има и интегрирана GPS антена. Данните от нея служат за позициониране и синхронизиране по RTC или UTC времена, но не може да се използва за определяне на надморската височина.

Освен гореизброените характеристики, по време на измерването софтуера извършва следните корекции – на земните приливи, на терена, на наклона на инструмента, на температура, филтриране на сеизмичен шум и FIR филтър.

Тъй като в момента не се произвежда, на пазара се предлагат само уреди втора употреба в повечето, случаи заводски рециклирани и калибрирани. Цените варират в границите 50-70000\$. Предлагат се също и за използване под наем.

Следващото поколение гравиметър на същата фирма е CG-6 Autograv™ Gravity Meter с доста подобрения, като нов софтуер с вградени карти и автоматично изчисляване на аномалиите на Буге, вграден GPS и др. Възможността за управление от таблет е една от новостите, която също е доста полезна. Не открих данни за използването му в археологията, но отзивите за работата му при проучвания в други области на науката са доста добри.

Съвместно използване на микрогравиметрията с други геофизични методи

Прилагането едновременно на няколко геофизични метода на един и същи обект отдавна се е наложило в практиката. Използвайки предимствата на всеки един от тях, получените резултати са по-коректни и дават много точна представа за скритите структури.

В Pasteka R. et al. (2019) е даден пример за съвместно използване на микрогравиметрия заедно с електросъпротивителна томография (ERT) и георадар (GPR).

Batayneh et. al (2007) представят проучване на археологически структури с микрогравиметрия, магнитометрия и електросъпротивителна томография (ERT).

И в двете публикации заключенията подкрепят съвместното използване на микрогравиметрията с други геофизични методи при проучване на археологически обекти и описват особеностите им.

Прилагане на метода в България

Гравитационни измервания в България за първи са извършени през 1926 година в град Провадия като целта е била търсене на солни залежи. Системни измервания на силата на тежестта на територията на цялата страна започват 1940-41 година и най-подробна информация за развитие на този процес до наши дни може да се намери в Михайлов и Радичев (2011). Голямото количество направени точни измервания за нуждите на геофизиката и геодезията, макар и с остаряла апаратура, е доказателство за професионализма на нашите специалисти.

Но за да се получат ефективни резултати при проучването на археологически обекти с този метод, е необходимо да се използват съвременни микрогравиметри с чувствителност 0,001mGal.

Няма информация за наличие на подобна апаратура у нас. Може да се предположи, че това е и причината до настоящия момент да не могат да бъдат открити данни за правени такива проучвания.

Заклучение

Гравитационните измервания като метод за проучване на археологически обекти, макар и да се прилага от скоро, е доказал своята ефективност. Той е особено подходящ за локализиране на подземни кухни под сгради. Независимо, че тези изследвания могат да бъдат направени и с други видове геофизична апаратура, неговото основно предимство е устойчивостта му към външни смущения. Обекти, намиращи се в градска среда, са почти винаги под въздействието на различни техногенни фактори.

Наличието на бетонни структури, железни шахти, кабели и др. биха затруднили и дори направили невъзможно прилагането на електросъпротивителна томография (ERT), георадар (GPR) или магнитометър.

Тези фактори не влияят по никакъв начин на резултатите от гравиметричните измервания. В същото време съвместното използване на няколко различни геофизични метода е гаранция за точността на крайните резултати.

Като единствен недостатък може да се изтъкне високата стойност на микрогравиметрите. Цената на последните модели варира от 115000\$ до 130000\$, а тези, втора употреба, са в диапазона 50000\$--70000\$. Но в същото време закупуването на такава апаратура ще позволи нейното ефективно използване и в други области, като геодезията и проучването на полезни изкопаеми.

В заключение може да се каже, че като ефективен неструктивен метод, микрогравиметрията трябва намери приложение и при проучване на археологически обекти в България.

Като цяло прилагането на геофизичните способности в тази област е силно ограничено, което от своя страна води до излишни разходи на време и пари, както и до ненужно увреждане на исторически обекти и артефакти.

Литература

Добрев, Т., П. Ставрев. 1977. *Основи на геофизиката. София.*

- Михайлов, Е., Р. Радичев. 2011. Гравиметрични измервания в България за периода от 1926 до 2011 година. - *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“. Том 54, Св. I, Геология и геофизика.*
- Abad, I., 2007. Non-destructive assessment of a buried rainwater cistern at the Carthusian Monastery ‘Vall de Crist’ (Spain, 14th century) derived by microgravimetric 2D modelling. – *Journal of Cultural Heritage*, 8(2007), 197–201
- Amarante, R., J. Trabanco. 2016. Calculation of the tide correction used in gravimetry. – *Article in Revista Brasileira de Geofísica*
- Barton, K., R. Pasteka, P. Zahorec, J. Papco. 2011. In search of hidden chambers at Newgrange passage tomb. – *Archaeology Ireland*, 254, 98, 11–12.
- Batayneh, A., J. Khataibeh, H. Alrshdan. 2007. The Use of Microgravity, Magnetometry and Resistivity Surveys for the Characterization and Preservation of an Archaeological Site at Ummer-Rasas, – *Jordan Archaeological Prospection Archaeol. Prospect.* 14, 60–70.
- Bishop, I. 1997. The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments. – *Modern Geophysics in Engineering Geology, Geological Society, Engineering Geology Special Publication*, 12, 153–166.
- Blizkovsky, M. 1979. Processing and applications in microgravity surveys. – *Geophysical Prospecting*, 27, 4, 848–861.
- Chalikakis, K., V. Plagnes, R. Guerin, R. Valois, F. Bosch. 2011. Contribution of Geophysical Methods to Karst-system Exploration an Overview. – *Hydrogeology Journal* (19).
- Eppelbaum, L. 2009. Application of microgravity at archaeological sites in Israel: some estimation derived from 3-D modeling and quantitative analysis of gravity field. – *22nd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems At: Texas, USA Volume: 22*
- Eppelbaum, L. 2011. Review of Environmental and Geological Microgravity Applications and Feasibility of its Employment at Archeological Sites in Israel. – *International Journal of Geophysics*.
- Friedrich, J., C. Gerstenecker, O. Gürkan. 1996. Gravimetric examination of Hagia Sophia’s subsurface structure. – *J. Geod* 70.
- Ismail, N., M. Yanis, F. Abdullah. 2018. Mapping buried ancient structure using gravity method: A case study from Cot Sidi Abdullah. – *North Aceh The 8th International Conference on Theoretical and Applied Physics*.
- Lakshmanan, J., J. Montlucon. 1987. Microgravity probes the Great Pyramid. – *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, 6, 1, 10–17.
- Linnington, R. 1966. The test use of a gravimeter on Etruscan chambered tombs at Cerveteri. – *Prospezioni Archaeology*, 1, pp. 37-41.
- Owen, T. 1983. Detection and mapping of tunnels and caves. *In: Fitch A. A., (Ed.), Development in Geophysical Exploration methods*, 5, 161258, Wiley, 209–221.
- Padin, J., A. Martin, B. Anquela. 2012. Archeological Microgravimetric Prospection Inside Don Church (Valencia, Spain). – *Archeological Science* 39.
- Panisova, J., R. Pasteka. 2009. The Use of Microgravity Technique in Archeology: a Case Study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia. – *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39/3, p. 237-254.
- Pasteka, R., D. Kusnirak, D. Wilken et al. 2019. Effective combination of microgravimetry and geoelectrical methods in the detection of subsurface cavities in archaeological prospection – *selected case-studies from Slovakia. Contributions to Geophysics and Geodesy Vol. 49/4*, 479–496.
- Pasteka R., J. Panisová, P. Zahorec, J. Papco, J. Mrlina, M. Frastia, G. Vargemezis, D. Kusnirak, I. Zvara, 2020. Microgravity method in archaeological prospection: methodical comments on selected case studies from crypt and tomb European *Cooperation in Science and Technology SAGA*.
- Radogna, P., R. Olivier, P. Logean, 2003. Evaluation et calcul des effets des constructions en microgravimétrie urbaine. *4 Colloque GEOFCAN 23-24*.
- Saibi, H. 2018. Microgravity and Its Applications in Geosciences *In book: Gravity - Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect*.
- Scintrex Ltd. 2012. *CG-5 Manual - part # 867700 Revision 8*.
- Torge, W., 1989. *In: Gruyter, Walter de (Ed.), Gravimetry*.
- Wenzel, G., 1999. *Earth Tide Data Processing Package, Eterna Version 3.32. User Manual*.