

## Анализ на прилаганите гравиметрични методи за локализиране на дълбочинно разположени кухини

Автор: Таня Славова

Таня Славова е магистър-инженер по геодезия, дипломирана от Университета по архитектура, строителство и геодезия през 2011 г. В момента е докторант към катедра „Висша геодезия“ на УАСГ по тема свързана с локализирането на кухини чрез гравиметрични методи. В края на 2013 г. печели конкурс за докторант-стипендиант на финансова група „Карол“. Професионалните интереси включват физическата геодезия, ГНСС и ГИС.

[contact@tanyaslavova.com](mailto:contact@tanyaslavova.com)



Основата на гравиметричните методи на изследване е естественото гравитационно поле на Земята. Измерването му с висока точност и резолюция дава възможност за решаването на задачи от различен ма-

щаб – от фундаментални за геодезията проблеми до практически задачи с локален характер, но от интердисциплинарна значимост. С технологичния прогрес през последните десетилетия диапазона на гравиметричните приложения се разшири значително, а физичният принцип, на който са основани, категорично затвърди предимствата им за някои конкретни цели.

Като обекти с известна плътност, различаваща се значителност от тази на обкръжаващата ги среда, локализирането на кухини под земната повърхност е класическа гравиметрична задача. От своя страна, точното определяне на тяхното положение, форма и размери е от значение за инженерните дейности, широк диапазон от научни области и екологията.

### Приложения

Геотехническите проблеми в карстовите райони провокират първите геофизични изследвания през 60-те години на XX век. Характерните про-



(фиг. 1).

цеси, протичащи в карбонатните скали, водят до образуването на различни по размер и дълбочина кухини, които са рисков фактор при проектирането, поддържането и експлоатацията на инженерни съоръжения. Само малка част от проучванията, извършени през това и следващите няколко десетилетия, обаче са добре документирани. Материалите по темата са едва няколко на брой, като гравиметрията и останалите геофизични методи за проучване на земните недра присъстват основно в книгите.

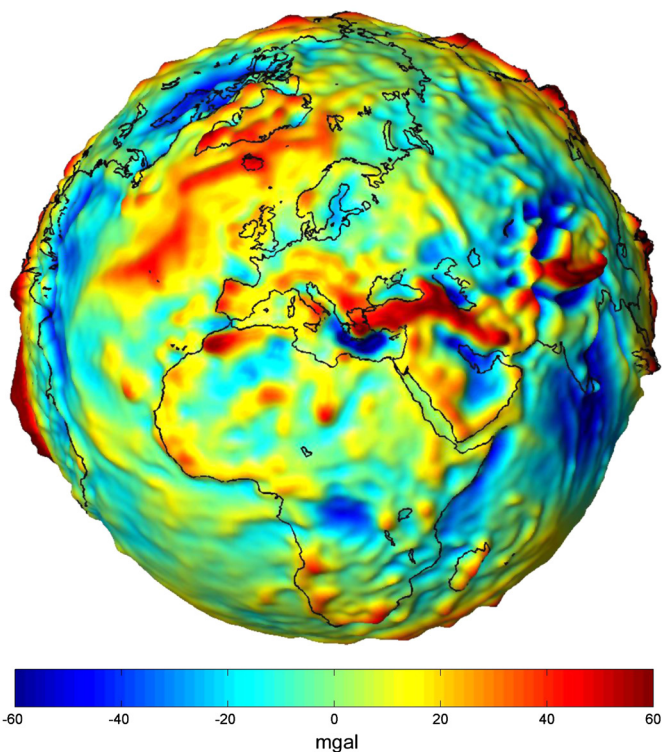
Благодарение на технологичното развитие, намалените разходи, опростената работа на терен и средствата за последваща обработка и анализ, в началото на 90-те години започва силен подем на геофизичните изследвания.

Осъзнатата връзка на проучванията с околната среда, инженерните дейности и археологията печели широк интерес в изследователската общност и през следващите две десетилетия се раждат разнообразни и иновативни решения на проблемите от практиката. Във времето гравиметрията се утвърждава като водещ подход за локализирането на кухини, изоставени тунели, бункери, крипти и други подземни обекти, както и за изследвания в областта на геодинамиката, а през последните години класическите приложения се допълват от нови, съвременни тенденции.

В зората на XXI век натрупаният опит дава възможност за обобщение на най-добрите практики в областта на гравиметричните изследвания (Murphy,

2001). Освен дигитализирането на уредите, автоматичното нанасяне на корекции към суровите измервания и други подобрения, през последните години точността на гравиметрията се повишава значително основно заради технологичната революция в областта на позиционирането. Към днешна дата ГНСС измерванията позволяват позиционирането на точки в тримерното пространство със сантиметрова точност в реално време.

Новите възможности в позиционирането са крачка към въздушната и космическа гравиметрия с висока пространствена резолюция и точност (фиг. 2). За съставянето на модели от глобален и регионален мащаб, данните от тях се използват за отделяне на регионалната компонента при решаване на задачи от локален характер.



(фиг. 2).

В обобщено издание на Канадската минна асоциация от 2012 г. за топ 100 на иновациите в минното дело за първото десетилетие на XXI в., под номер 13 се нарежда въздушната гравиметрия. За сравнение на по-предни позиции в категорията за проучвания се нареждат софтуерните средства за обработка, анализ и визуализация на данните, ГНСС<sup>1</sup>, а следващи са методи като LIDAR<sup>2</sup>, електромагнитните изследвания, спътниковите снимки със субметрова точност и др. В комбинация със съвременните средства за позициониране и модерните възможности за анализ и визуализация на пространствена информация чрез ГИС<sup>3</sup>, методът се прилага успешно за локализиране на обекти под земната повърхност.

През първото десетилетие на XXI в. гравиметричните методи вече намират широко приложение в редица области. Сред най-популярните са изследванията на карстови структури (Chalikakis, 2011), геодинамика (Imanishi, 2009), хидрогеология (Wilson, 2012), при търсене на полезни изкопаеми. Съвременна и изключително перспективна тенденция се очертава в областта на археологическите проучвания (Padin, 2012; Eppelbaum, 2011; Panisova, 2009).

В световен мащаб локализирането на кухни чрез гравиметрия е утвърдена

1 ГНСС – глобални навигационни спътникови системи

2 LIDAR – Light Identification Detection And Ranging – лазерна технология за измерване на разстояния

3 ГИС – географски информационни системи

в годините практика. През последното десетилетие класическото приложение е разширено в съчетание с най-съвременните методи и средства за постигането на максимални резултати.

### Оборудване

Въпреки сравнително високата точност, резолюция и икономическа ефективност на спътниковата и въздушна гравиметрия, наземните методи запазват своите безпрецедентни възможности за локализирането на кухини. Измерванията се осъществяват в профили или мрежа от точки, в които се извършват наблюдения с относителни гравиметри – инструменти, отчитащи разликата в силата на тежестта между отделните станции.

Портативните гравиметри за наземни измервания датират от 50-те на ХХ в. Ранните модели все пак притежават сериозни ограничения по отношение на тяхното тегло, измервателен обхват и здравина. Значително оптимизиране на техните размери следва десетилетие по-късно.

През 1959 г. е представен моделът LaCoste & Romberg G, който се превръща в индустриален стандарт за цели три десетилетия. С някои подобрения през 1967 г. се появява L&R D, осигуряващ точност от  $0.005 \text{ mGal}^4$  - достатъчна за локализирането на кухини. Двата модела притежават обаче и някои недостатъци, а популярността им за периода се дължи до голяма степен на липсата на алтернатива по онова време.

Нуждите на практиката обаче налагат

все по-високи изисквания по отношение на гравиметрите. В началото на 90-те локализирането на кухини за целите на строителство в карстови райони и изоставени мини, като естествени резервоари в хидрогеологията, антропогенни структури в археологията и т.н. изискванията за точност на измерванията, е ясно дефинирано под термина микрогравиметрия. До този момент L&R D (фиг. 3) е единственият подходящ гравиметър. Инструментите обаче са механични, точността им е в тясна зависимост от уменията на оператора, а принципът им на работа е характерен за портативните наземни гравиметри в периода 1950-1989 (Siegel, 1995).



(фиг. 3)

Във всички изследователски направления метрологичната еволюция следва обратнопропорционална зависимост от опита на оператора за

4  $1 \text{ mGal} = 1.10^{-5} \text{ m/s}^2$

повишаване прецизността на измерванията. Интегрирането на модерни техники за електронни измервания, обработка на сигналите и съхранение на данните, автоматични корекции и отчети са качествата, заложили като характеристики на гравиметрите от ново поколение.

Още през 1984 г. компанията Scintrex си поставя амбициозната задача да създаде нов инструмент с точност като на L&R и по-висока, като същевременно отстрани някои функционални ограничения. Въпреки че компанията има 25-годишен опит в производството на модела CG-2, интегриращ в себе си електроника и софтуер, тя успява да реализира новия CG-3 едва през 1989 г. Отнема им още 2 години, за да създадат CG-3M, който с точност 0.005

mGal посреща изискванията за целите на микрогравиметрията и се превръща в новия стандарт.

В зората на новия век гравиметрията е изнесена на качествено ново равнище. През 2002 г. се появява наследникът на CG-3M – най-новият, по-малък и по-лек Scintrex CG-5 (фиг. 4). С точност 0.001 mGal, корекции на измерванията в реално време и връзка с външни устройства, уредът достига връх в гравиметрията и интегрирането в изследователските системи.

Междувременно през 2001 г. двата лидера в производството на гравиметри през годините се обединяват в нова компания известна като LaCoste & Romberg – Scintrex. От съществено значение за минната и геотехническата индустрия е първият гравиметър за измервания в сондажни дупки, който тя създава през 2008 г. Две години по-късно създава гравиметър, базиран на CG-5, за измервания на морското дъно на дълбочина до 5 000 m. Днес LaCoste & Romberg – Scintrex произвежда над 90% от гравиметрите на световния пазар.

Макар работата с гравиметър да не е сложна, прецизните микрогравиметрични изследвания изискват внимание към някои допълнителни особености при работата на терен. От особено значение е определянето на котите в точките на измерванията с точност не по-ниска от няколко сантиметра. Промяна от 1 m във височина, се равнява на разлика от 0.3 mGal – стойност значително по-голяма от точността на използваните гравиметри. При работа със съвременни ГНСС приемници



(фиг. 4).

определянето на пространствено положение (включително височина) на точка с точност 1 cm в реално време не е проблем (фиг. 5). Под гъстата сянка на дърветата обаче или в сгради, където липсва спътников сигнал, се налага използването на тотална станция, теодолит и/или нивелир за координиране на гравиметричните отчети.



(фиг. 5).

## ТЕХНОЛОГИЯ

С годините настъпват някои изменения в технологията на гравиметричните измервания основно в посока повишаване точността на измерванията и дигитализирането на уредите. Развитието на компютърната обработка и визуализация на данните също допринася съществено за качествения и количествен анализ на резултатите. Основният принцип на работа за решаване на задачи от локален характер обаче запазва класическия си вид.

Причина за избор на гравиметричните методи за изследване на кухини е преди всичко физичните свойства, към които са чувствителни. Гравиметрите отчитат с висока точност разликите в гравитационното поле, породени от разпределението на масите под земната повърхност. Кухините, изпълнени с въздух или вода, са аномални обекти, чиито плътности са известни константи - съответно 0 и 1 g/cm<sup>3</sup>, и се различават значително от скалата, чиято плътност е със средна стойност 2.67 g/cm<sup>3</sup>. При измервания, организирани в профили или мрежа от точки на повърхността, се наблюдават сравнително по-ниски стойности на отчетите над кухините спрямо тези над хомогенна основа.

Площта и гъстотата на точките, в които се извършват наблюдения, са обосновани от размера на търсения обект и необходимата резолюция. За постигането на детайлна картина при локализирането на кухини, интервалът между точките достига дори до 2-5 m в някои от изследванията (Padin, 2012). Върху суровите гравиметрични измервания се нанасят корекции поради въздействията на околната среда, причинени от инструментален и ситуационен характер:

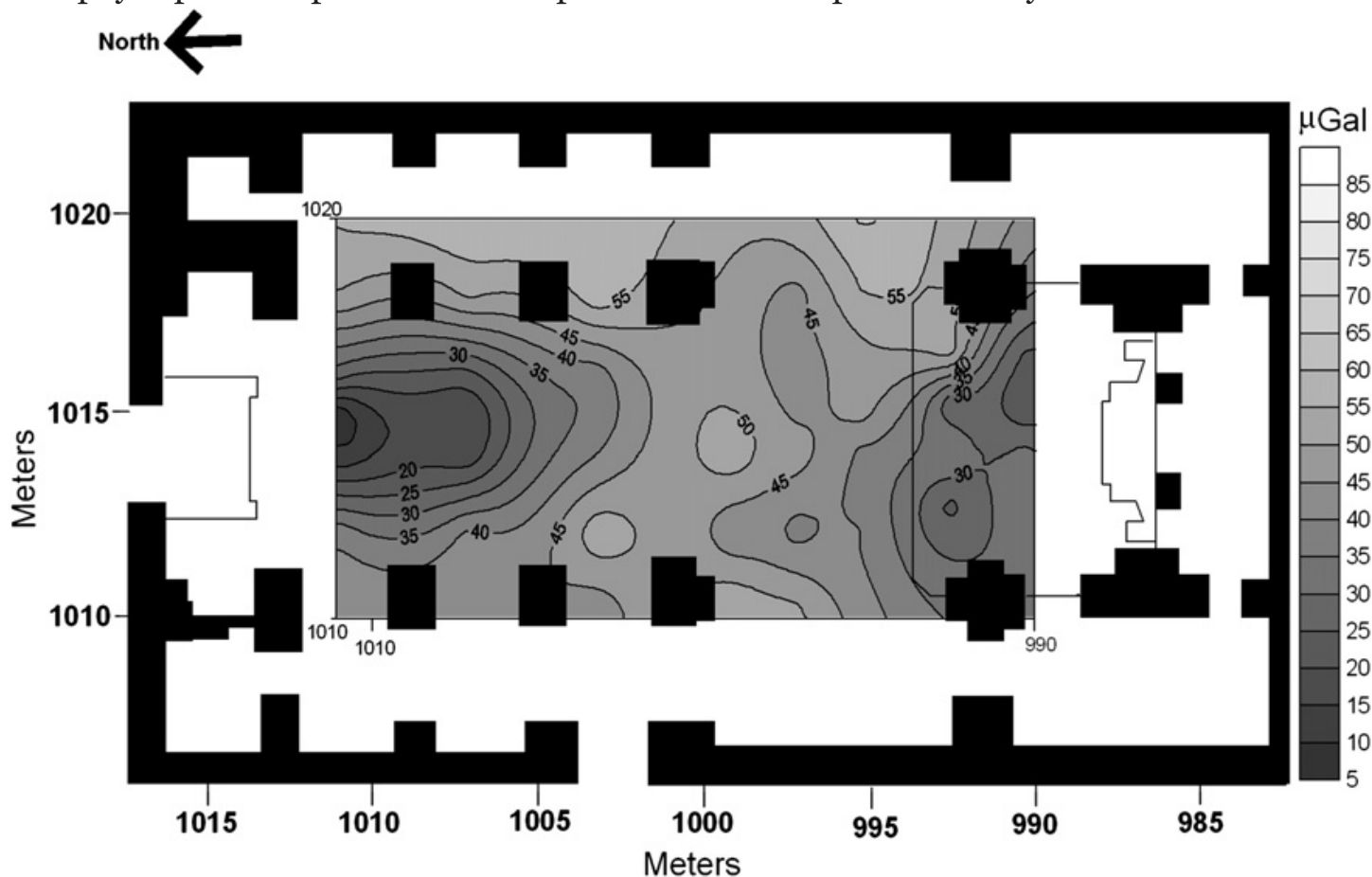
- приливни корекции
- корекции на височината на инструмента
- корекции заради атмосферното налягане
- корекции заради дрейфа на нулата
- корекция заради географската ширина

- топографска корекция.

В преобладаваща част от изследванията върху измерванията се прилагат посочените по-горе стандартни корекции, но за някои специфични задачи се налага въвеждането на допълнителни. През 2012 г. в статия на Хорхе Падин и екипа му е публикувано изследване проведено в исторически обект – църква, която е в днешния си вид от XVIII век. Реставрация в края на XX век обаче подсказва наличието на стара крипта, която става причина на организираното гравиметрично изследване. Дебелите 1 m стени с плътност  $2.1 \text{ g/cm}^3$  оказват значителна влияние върху гравиметричните измервания

в точки на разстояние по-малко от 2 m до тях, поради което при проектирането на мрежата е спазено това отстояние (фиг. 6). Тъй като обектът се намира в урбанизирана територия, са въведени корекции и заради влиянието на околните сгради.

Макар гравиметричните методи да са едни от малкото, които се считат с неограничена чувствителност в дълбочина, различните им приложения и размер на търсените обекти налагат такива. При локализирането на кухни зависимостта от Нютоновия закон за всеобщото привличане е ясно изразена. Колкото по-голям е обектът, толкова по-отчетливо е влиянието му на повърхността. С увеличаване на не-



(фиг. 6).

говата дълбочина обаче гравитационното му влияние отслабва значително по-бързо. Така на практика може да се окаже, че кухня с по-малки размери, но близо до повърхността може да бъде локализирана, докато кухня със значително по-големи размери, но на по-голяма дълбочина може да остане „незабелязана“. Още през далечната 1964 г. в едно от първите изследвания за локализиране на кухни чрез гравиметрия, Реймунд Чико дефинира някои минимални стойности, отчитащи формата на тялото, неговите размери и дълбочина, във връзка с чувствителността на гравиметричните методи. Към днешна дата те подлежат на преразглеждане предвид съществените подобрения, внесени в измервателните уреди.

Измерените и обработени, гравиметрични данни се подлагат на качествена интерпретация, свързана с общия характер на аномалното поле, неговите особености, разпространение и т.н. При наличието на кухни се наблюдават отрицателни аномалии, по чиято форма може да се съди дали обектите са галерии или зали.

Количествената интерпретация е свързана с решаване на обратната задача от теорията на потенциала – при известни стойности на силата на тежестта да се определи смущаващото тяло или тела, тяхното разположение, размери, плътност. Тъй като всички тези параметри следва да се определят от измерените на повърхността стойности, в общ вид задачата няма еднозначно решение. Възможните варианти могат да се ограничат чрез въвеждане на до-

пълнителни условия, формулирани от геоложки и геофизични наблюдения. Към края на ХХ в. се формира твърдението, че в сравнение с повишаващата се точност в измервателните средства на един вид геофизични изследвания, използването на комбинация от методи осигурява далеч по-богата информация за подземния обект (Erkan, 2011). Голяма част от изследванията на кухни през последните 15 години са проведени именно по този начин – като комбинация от гравиметрични и георадарни измервания, изследването на електрическо съпротивление на прав ток, капацитивно съпротивление, индуцирана поляризация и земна проводимост (Brown, 2011); гравиметрични и електромагнитни измервания и изследването на естествения потенциал (Lange, 1999); гравиметрия, електрическо съпротивление и електрическа томография (McGrath, 2002). През 2011 г. е публикуван сравнителен анализ на трите най-популярни метода за локализиране на кухни – гравиметрия, магнитометрия и георадарни измервания. Резултатите от методите са равностойни на дълбочина до няколко метра във варовик, но с увеличаването на дълбочината и промяна на характеристиките на средата, качествата на магнитометрията и георадарните изследвания отстъпват пред измерванията с гравиметър.

Повече от половин век изследванията на подземни кухни привличат вниманието на специалистите. Гравиметричните методи се утвърждават като водещ подход, чиито предимства се увеличават съществено през послед-

ните 20 години, както поради развитието на измервателната техника, така и заради възможностите им за интегрирането им в различни изследователски системи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brown W. A., Stafford K. W., Shaw-Faulkner M., Grubbs A. A Comparative Integrated Geophysical Study of Horseshoe Chimney Cave, Colorado Bend State Park, Texas. *International Journal of Speleology*, 2011.
2. Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Valois R., Bosch F. Contribution of Geophysical Methods to Karst-system Exploration: an Overview. *Hydrogeology Journal* (19), 2011.
3. Department of Environmental Protection. Standard References for Geophysical Investigations. Commonwealth of Massachusetts, 1994.
4. Eppelbaum L. V. Review of Environmental and Geological Microgravity Applications and Feasibility of its Employment at Archeological Sites in Israel. *International Journal of Geophysics*, 2011.
5. Erkan K., Jekeli C. A Comparative Analysis of Geophysical Fields for Multi-sensor Applications. *Journal of Applied Geophysics* 74, 2011.
6. [Http://www.scintrexltd.com](http://www.scintrexltd.com)
7. Imanishi Y., Tamura Y., Ikeda H., Okubo S. Permanent Gravity Changes Recorded on Superconducting Gravimeters from Earthquakes in Central Japan – the Noto Hantou and Niigataken Chuetsy-oki Events in 2007. *Journal of Geodynamics* 48, p. 260-268, 2009.
8. Lange A. L. Geophysical Studies at

Kartchner Caverns State Park, Arizona. *Journal of Cave and Karst Studies* 61 (2), p. 68-72, 1999.

9. McGrath R. J., Styles P., Thomas E., Neale S. Integrated High-resolution Geophysical Investigations as Potential Tools for Water Resource Investigations in Karst Terrain. *Environmental Geology* 42, p. 552-557, 2002.
10. Minalliance. 100 Innovations in the Mining Industry. The Mining Association of Canada, 2012.
11. Murray A. S., Tracey R. M., Best Practice in Gravity Surveying. *Geoscience Australia*, 3, 2001.
12. Padin J., Martin A., Anquela A. B. Archeological Microgravimetric Prospection Inside Don Church (Valencia, Spain). *Archeological Science* 39, 2012.
13. Panisova J., Pasteka R. 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, 2009.
14. Siegel H. O. A Guide to High Precision Land Gravimeter Surveys. 1995.
15. Wilson C. R., Wu H., Scanlon B., Longuevergne L., Sharp J. The Superconducting Gravimeter as a Field Instrument Applied to Hidrogeology, Geodesy for Planet Earth, 2012.

*Таня Славова*  
*contact@tanyaslavova.com*