

Таня Славова

ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ДЪЛБОЧИННО РАЗПОЛОЖЕНИ КУХИНИ,
ПОСРЕДСТВОМ ГРАВИМЕТРИЧНИ МЕТОДИ

Таня Славова

**ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ДЪЛБОЧИННО РАЗПОЛОЖЕНИ КУХИНИ,
ПОСРЕДСТВОМ ГРАВИМЕТРИЧНИ МЕТОДИ**

**ИК „Свети Иван Рилски“
София, 2026 г.**

ISBN 978-954-353-504-0

© Таня Веселинова Славова-Гурева, автор
ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ДЪЛБОЧИННО РАЗПОЛОЖЕНИ КУХИНИ,
ПОСРЕДСТВОМ ГРАВИМЕТРИЧНИ МЕТОДИ

Първо издание, българска
София, 2026 г.

Научен редактор: проф. д-р инж. Славейко Господинов

Рецензент: проф. д-р инж. Славейко Господинов

Всички права са запазени! Не се разрешава копиране, възпроизвеждане и разпространение на тази книга или части от нея по какъвто и да е начин без разрешение на автора.

ИК „Свети Иван Рилски“

ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ДЪЛБОЧИННО РАЗПОЛОЖЕНИ КУХИНИ, ПОСРЕДСТВОМ ГРАВИМЕТРИЧНИ МЕТОДИ

Автор: д-р инж. Таня Веселинова Славова-Гурева

Настоящото издание представлява книга на база защитен дисертационен труд. В него е представена същността на проблема свързан с локализирането на кухини и неговата значимост. Разгледани са нерешените проблеми и възможностите за оптимизиране на метода, използван за откриването на пещерни образувания. Описан е възприетият подход, като са изложени мотиви и аргументи за направения избор. Представено е проучване в Пернишкия карстов район.

Книгата е предназначена за геодезисти с интереси в областта на гравиметрията, геофизици, спелеолози и други изследователи, отдадени на гравиметрията и пещерите.

СЪДЪРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Съдържание..... | 5 |
| Списък на таблиците..... | 8 |
| Списък на фигурите | 9 |
| Въведение..... | 12 |
| 1. Същност на проблема и неговата значимост | 15 |
| 1.1. Предмет на геофизиката | 16 |
| 1.2. Права и обратна задача земния потенциал | 16 |
| 1.3. Практически аспекти на проблема | 18 |
| 1.4. Значимост | 20 |
| 1.5. Обобщение | 26 |
| 2. Нерешени проблеми – възможности за оптимизиране на метода | 27 |
| 2.1. Историческо развитие на проблема..... | 27 |
| 2.2. Основна теория | 31 |
| 2.3. Гравиметрични методи | 33 |
| 2.4. Измерване на силата на тежестта..... | 35 |
| 2.5. Технология | 37 |
| 2.6. Обобщение | 41 |
| 3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи .. | 42 |
| 3.1. Планиране на изследването | 42 |
| 3.1.1. Данни за района..... | 43 |
| 3.1.2. Проектиране на наблюденията | 43 |
| 3.1.3. Оборудване | 45 |
| 3.2. Работа на терен | 47 |
| 3.3. Обработка на гравиметричните измервания..... | 48 |
| 3.3.1. Предварителна обработка..... | 48 |
| 3.3.2. Изчисляване на силата на тежестта..... | 51 |
| 3.3.2.1. Параметрично изравнение на гравиметрична мрежа | 52 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.3.2.2. | Параметрично изравнение на гравиметрична мрежа с въвеждане скоростта на дрейфа като допълнително неизвестно..... | 53 |
| 3.3.3. | Изчисляване на аномалиите на силата на тежестта..... | 54 |
| 3.3.3.1. | Аномалия „свободен въздух“..... | 58 |
| 3.3.3.2. | Аномалия „Буге“..... | 59 |
| 3.4. | Анализ и интерпретация на резултатите..... | 60 |
| 3.4.1. | Представяне на резултатите..... | 60 |
| 3.4.2. | Филтрация на данните..... | 61 |
| 3.4.3. | Анализ на качеството на данните..... | 65 |
| 3.4.4. | Локализиране на кухни..... | 66 |
| 3.5. | Обобщение..... | 67 |
| 4. | Описание на района – физико-географски и геоложки характеристики | 69 |
| 4.1. | Релеф, общ геоложки и хидрогеоложки строеж на Боснешкия карстов район..... | 70 |
| 4.2. | Пещера Живата вода..... | 73 |
| 4.3. | Обобщение..... | 75 |
| 5. | Подготовка на експеримента..... | 76 |
| 5.1. | Проектиране на наблюденията..... | 76 |
| 5.2. | Избор на инструменти..... | 78 |
| 5.2.1. | Гравиметър..... | 78 |
| 5.2.2. | ГНСС приемник..... | 79 |
| 5.2.3. | Тотална станция..... | 80 |
| 5.3. | Обобщение..... | 82 |
| 6. | Реализация на измерванията..... | 83 |
| 6.1. | Пространствени определения..... | 83 |
| 6.1.1. | Заснемане на пещерата..... | 83 |
| 6.1.2. | Трасиране на гравиметричната мрежа..... | 84 |
| 6.1.3. | Прецизно заснемане на гравиметричните станции..... | 85 |
| 6.2. | Гравиметрични измервания..... | 86 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| 6.2.1. | Изследвания на дрейфа на гравиметъра | 87 |
| 6.2.2. | Същински гравиметрични измервания | 87 |
| 6.3. | Обобщение | 89 |
| 7. | Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация | 91 |
| 7.1. | Обработка на пространствените данни | 91 |
| 7.1.1. | Координатите на точките от РГО | 91 |
| 7.1.2. | Координатите на полигоновите и подробните точки | 92 |
| 7.1.3. | Тримерен пещерен модел | 92 |
| 7.1.4. | Координати и точност на гравиметричните станции | 93 |
| 7.1.5. | Дълбочина на пещерата | 100 |
| 7.2. | Обработка на гравиметричните данни | 101 |
| 7.2.1. | Изследване на дрейфа на гравиметъра | 102 |
| 7.2.2. | Обработка на гравиметричната мрежа | 106 |
| 7.2.2.1. | Изчисляване на силата на тежестта | 106 |
| 7.2.2.2. | Изчисляване на аномалиите на силата на тежестта | 113 |
| 7.3. | Анализ и интерпретация на резултатите | 114 |
| 7.3.1. | Карти на аномалията „Буге“ | 115 |
| 7.3.2. | Профили на аномалията „Буге“ | 121 |
| 7.4. | Обобщение | 136 |
| Изводи | | 138 |
| Библиография | | 140 |

СПИСЪК НА ТАБЛИЦИТЕ

| | |
|--|-----|
| Таблица 1. Адекватност на наземните геофизични методи за изследване на кухини..... | 30 |
| Таблица 2. Константи на гравиметъра | 79 |
| Таблица 3. Координати и точност на точките от РГО..... | 91 |
| Таблица 4. Координати и точност на точките от полигоновия ход | 92 |
| Таблица 5. Координати и точност на определените с ГНСС гравиметрични станции | 94 |
| Таблица 6. Координати и точност на гравиметричната мрежа | 96 |
| Таблица 7. Изследване на дрейфа на гравиметъра. | 105 |
| Таблица 8. Резултати от МНМК1 и МНМК3 | 108 |
| Таблица 9. Статистически данни за цифровия модел на релефа - разлики с измерените ГНСС точки | 113 |
| Таблица 10. Стойност на топографския ефект при плътност 2.60 g/cm^3 в зависимост от разстоянието | 114 |

СПИСЪК НА ФИГУРИТЕ

| | |
|--|-----|
| Фигура 1. Постановка на правата и обратна гравиметрична задача..... | 18 |
| Фигура 2. Топографски редукции. | 56 |
| Фигура 3. Еднодименсионален филтър на Ханинг за 5 точки | 62 |
| Фигура 4. Двудименсионален филтър на Ханинг за 7 x 7 точки | 63 |
| Фигура 5. Еднодименсионална филтрация с размер (брой възли) на прозореца $m=5$ по профил с дължина g | 64 |
| Фигура 6. Двумерен полиномен филтър с размери на прозореца $m=7$ по редове и $k=5$ по колони в точка (i,j) | 65 |
| Фигура 7. Извадка от ГИС системата за Боснешкия карстов район..... | 72 |
| Фигура 8. Склонът, под който е разположена пещера Живата вода | 74 |
| Фигура 9. Извор Живата вода.. | 74 |
| Фигура 10. Проектираната гравиметрична мрежа..... | 77 |
| Фигура 11. Измервания с тоталната станция в пещерата | 84 |
| Фигура 12. ГНСС измервания на точка E2..... | 86 |
| Фигура 13. Гравиметрични измервания в източната част на мрежата | 88 |
| Фигура 14. Схема на извършените гравиметрични измервания | 89 |
| Фигура 15. Планов изглед на пещерния модел | 93 |
| Фигура 16. Дълбочина на тавана на пещерата под повърхността на гравиметричната мрежа | 101 |
| Фигура 17. Изследване на дрейфа на гравиметъра по дни | 104 |
| Фигура 18. Средни квадратни грешки на силата на тежестта при МНМКЗ | 108 |
| Фигура 19. Аномалия "Буге" | 116 |
| Фигура 20. Аномалия "Буге", филтрирана по метода „Ханинг“, прозорец 11 x 11 точки | 117 |
| Фигура 21. Филтрация на аномалиите "Буге" с полином от втора степен и размер на прозореца 41 x 41 точки | 119 |
| Фигура 22. Аномалия "Буге", филтрирана еднократно с полином от втора степен с прозорец 0 x 71 точки (само по напречни профили) | 120 |
| Фигура 23. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил E..... | 122 |
| Фигура 24. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил D | 123 |

| | |
|--|-----|
| Фигура 25. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил С | 123 |
| Фигура 2.26. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил В | 124 |
| Фигура 27. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил А | 124 |
| Фигура 28. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил F | 125 |
| Фигура 29. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил G | 125 |
| Фигура 30. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил H | 126 |
| Фигура 31. Аномалия "Буге" над пещерата: профил E | 128 |
| Фигура 32. Аномалия "Буге" над пещерата: профил D | 129 |
| Фигура 33. Аномалия "Буге" над пещерата: профил C | 130 |
| Фигура 34. Аномалия "Буге" над пещерата: профил B | 131 |
| Фигура 35. Аномалия "Буге" над пещерата: профил A | 132 |
| Фигура 36. Аномалия "Буге" над пещерата: профил F | 133 |
| Фигура 37. Аномалия "Буге" над пещерата: профил G | 134 |
| Фигура 38. Аномалия "Буге" над пещерата: профил H | 135 |

Пещерите са най-близкото до машина на времето нещо, с което разполагаме... Има много основателни причини за тяхното опазване, особено онези от тях, които ни отвеждат в непознатото.

Проф. Тим Фланъри¹

ВЪВЕДЕНИЕ

Знанието за Земята е в основата на нашето съществуване. В нея е запечатано миналото ни, от нея черпим ресурс за бъдещето, а опазването ѝ в настоящето е от съществено значение за нашия живот. Търсенето на суровини, стабилна геоложка основа за проектиране на строителни и инфраструктурни обекти, подземни резервоари на прясна вода в земната кора са само част от задачите пред различни изследователи, в търсене на точен отговор на въпроса какво и къде е скрито под повърхността.

С естествен или антропогенен произход, дълбочинно разположените кухни са обекти, които биха могли да дадат ключа към отговора на разнообразни въпроси. Настоящата книга е насочена както към колеги в областта на геодезията като наука, изучаваща размерите и външното гравитационно поле на Земята – основа за реализацията на специализирани измервания, свързани с проучването, строителството и експлоатацията на инженерни съоръжения, така и към един по-широк кръг от специалисти. За получаване параметрите на проучваните обекти и осигуряването на непосредствен достъп до тях, крайните резултати са от интерес за изследователи в областта на спелеологията, геологията, геоморфологията, хидрогеологията, биологията, археологията, палеонтологията и други.

Недокоснати от човека пещери крият в себе най-старите микроорганизми на планетата, чието изследване би могло да допринесе за получаването на нови лекарства. В тях се намират неизвестни досега

¹ През 2005 г. е обявен за австралийски хуманист на годината, а през 2007 г. – за австралиеца на годината.

материали с непознати свойства. Това прави значението на подземния свят за науката дори по-голямо от непосредствените очаквания.

В исторически план, необходимостта от проучване и оценка на геотехническите проблеми, свързани с подземните кухни, понори и епикарстови структури насочва изследователският интерес към комплексната природа на карста. В световен мащаб геофизичните изследвания върху карстови райони датират 50 години назад. От началото на 90-те години на миналия век, интересът към тях силно нараства както поради развитието на технологиите, така и заради осъзнатото значение по отношение на околната среда, инженерните дейности и археологията. В изследванията през тези години гравиметрията категорично присъства както самостоятелно, така и в съчетание с други методи за редуциране на нееднозначността при определяне на подземните обекти. В България гравиметрични изследвания са използвани основно за изследване на разломни структури и регистриране на находища. За локализиране на кухни гравиметрични методи у нас все още не са прилагани.

Гравиметричните методи за изследване са ориентирани и обусловени от естественото поле на силата на тежестта. Резултатите от тях дават възможност да се съди за разпределението на тела с различна плътност под повърхността на Земята. Това прави гравиметрията особено подходяща за търсене на кухни в земната кора - обекти изпълнени с въздух или вода, чиито плътности са известни константи, различаващи се значително от тези на скалата, в която са разположени. Съвременните гравиметри осигуряват добра чувствителност, което ги прави приложими за изследвания на големи дълбочини, а подходящата обработка на получените данни дава възможност за интерпретация относно разположението и размерите на аномалните тела. Методът предполага едно добро площно покритие, което е значително преимущество пред данните, получени в отделни точки или по дължините на профили. Намира неограничено приложение както в природата, така и в урбанизирани райони и дори в затворени помещения, работата с тази апаратура е тиха и не предизвиква нарушения на средата. Уредите са портативни, а един човек е достатъчен за извършване на измерванията.

Индиректното приложение на гравиметричните методи се характеризира с една основна особеност. В теорията на потенциала проблемът с аномалните обекти и силата на тежестта, която поражда, присъства под формата на две задачи. Т. нар. права задача се дефинира от

един или няколко известни обекта, чието аномално поле следва да се изчисли, и решението ѝ е еднозначно. При обратната задача трябва да се определи смущаващото тяло или тела, тяхната форма, разположение и плътност. Всички тези параметри следва да се определят от измерената на повърхността стойност на силата на тежестта, поради което в общ вид тя няма еднозначно решение. Възможните решения могат да се ограничат чрез въвеждане на допълнителни условия, формулирани от допълнителни геоложки, геофизични и други наблюдения. Тези особености са залегнали в основата на настоящата книга.

1. СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА И НЕГОВАТА ЗНАЧИМОСТ

Кухините, разположени под земната повърхност, представляват интерес за широк кръг от специалисти. Директният достъп до образуванията по естествен път пещери е основна задача на техните преки изследователи – спелеолозите. Към тях се присъединяват археолози и палеонтолози в издирване на артефакти и вкаменелости; биолози, изследващи разнообразието от подземни обитатели; минеролози и други учени. Кухините с антропогенен произход, каквито са старите крипти, изоставени бункери, затрупани тунели и дори военни убежища от тактически интерес, допълват списъка на търсените подземни обекти.

Прекият изследователски интерес към подземните кухни се допълва от комплексната им значимост в екологичен и икономически аспект. Техният произход, размери, форма и разположение под повърхността са от значение в геоложката интерпретация и минното дело; имат положителна роля като естествени водни резервоари и същевременно рисков фактор при проектирането, изграждането и поддръжката на инженерни съоръжения и сгради.

Десетилетия наред геофизиката намира широко приложение за характеризиране на геоложки дадености, установяване на природни ресурси, както и за оптимизиране на сондажни дейности. Същността на геофизичните методи се заключава в изучаване на земните недра с помощта на физическите закони, като на повърхността на Земята или в близост до нея, се извършват измервания, на които влияние оказват разпределението на различни физични параметри в дълбочина. Анализът на резултатите от тях позволяват да се разбере как се изменят физичните свойства вътре в Земята във вертикално и хоризонтално направление.

При извършване на работи с различен мащаб с помощта на геофизични методи могат да се решат широк кръг от задачи – от изучаване на Земята като цяло до изследване на ограничени райони в горните части на земната кора. Индиректното им приложение и ограничената информация за средата под повърхността обаче обуславят общ, характерен проблем.

1.1. ПРЕДМЕТ НА ГЕОФИЗИКАТА

Геофизичните методи имат за цел да характеризират вариациите на физичните параметри на подземните образувания. Измерванията отчитат тяхното изменение, което се дължи на промяната на едно или повече физични свойства и тяхното пространствено разпространение. За различните проучвателни методи има специфично „действащо“ физично свойство на средата, което обуславя съответните им приложни области. Пространствените вариации на интензитета на гравитационното поле, породено от плътността на скалата, например, са обект на гравитационните изследвания, намиращи приложение при находища на полезни изкопаеми, минерални отлагания, подземни води, инженерно-строителни проучвания и др.

Методите, използвани за земни проучвания, биват две основни групи – такива, които са базирани на естествените полета на Земята, и такива, при които в нея изкуствено се възбужда енергия (Кири, 1988). Гравитационните изследвания спадат към първата група наред с тези на магнитните, електрическите и електромагнитните полета и локалните им смущения, които могат да бъдат свързани със скрити образувания, представляващи геоложки или друг интерес. Характерно за методите с естествените полета е, че те са ефективни и за приложения на значителна дълбочина.

При някои от геофизичните методи основен интерес представлява локалното изменение на изследвания параметър спрямо някаква фонова стойност. Вариациите от този тип се наричат геофизични аномалии. Например, ако плътността под земната повърхност е еднаква, то гравитационното поле, след въвеждането на определени поправки, би трябвало да е постоянно. Наличието на някаква локална вариация на плътността обаче е свързана с изменение на геоложкия строеж в изследвания район. Това отклонение от еднородното гравитационно поле се нарича гравитационна аномалия (аномалия на силата на тежестта). Със своите сравнително малки размери и плитка дълбочина на разпространение именно в категорията на локалните задачи попада и търсенето на подземни кухини.

1.2. ПРАВА И ОБРАТНА ЗАДАЧА ЗЕМНИЯ ПОТЕНЦИАЛ

Ако вътрешният строеж и свойства на Земята биха били точно известни, би могло със сигурност да се определят основните геофизични параметри на повърхността ѝ. Основната задача на геофизичните

1. Същност на проблема и неговата значимост

проучвания е противоположна – на база резултатите от подходящо подбрани измервания, извършени на повърхността на Земята или в близост до нея, да се извлече информация за вътрешния ѝ строеж. Задачи от първия тип се наричат прави, а от втория – обратни. Еднозначното решение на правата задача теоретично е възможно, а обратната е характерна със своята вътрешна нееднозначност или неединственост на изводите, които могат да бъдат направени. Степента на неопределеност на геофизичната интерпретация обикновено се налага да бъде сведена до някакво приемливо ниво.

Под права задача в теорията на потенциала се разбира определянето на гравитационния, магнитния или електричния потенциал (или на техните производни), когато е известно положението и свойствата на пораждащите ги източници (Зидаров, 1984). Решаването ѝ се състои в определянето на стойностите на функциите на съответния потенциал в дадена точка, принадлежаща обикновено на някоя повърхнина.

В контекста на правата гравиметрична задача, решението на проблема се състои в определяне стойността на гравитационния потенциал V в точка Q по формулата:

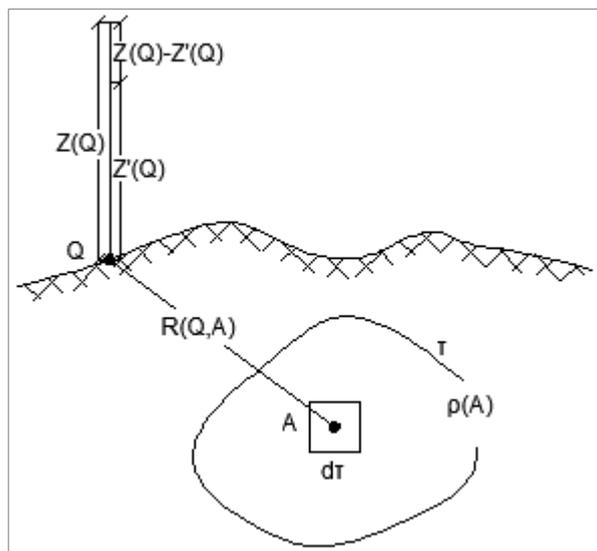
$$V(Q) = \int_{\tau} \frac{\rho(A)d\tau_A}{R(Q,A)} \quad (1),$$

където τ е известно тяло, в което са разположени гравитационни маси с плътност $\rho(x,y,z)$, A е точка, принадлежаща на τ , а $R(Q,A)$ е разстоянието между точките Q и A (Фигура 1).

Аналитични изрази за функциите, било то на гравитационния или друг вид потенциал, са получени само за тела с проста форма, каквито са, например, сферичните и елипсоидни повърхнини, оградени с повърхнини от втора степен, и определена плътност. В останалите случаи правата задача се решава по числов път, като даденото тяло се разбива на елементарни кубчета $\Delta\tau_k$, $k=1,\dots,n$. Така формула (1) добива вида:

$$V(Q) = \sum_{k=1}^n [\rho(A_k) / R(Q, A_k)] \Delta\tau_k \quad (2),$$

където $\rho(A_k)$ е стойността на функцията ρ в центъра A_k на кубчетата $\Delta\tau_k$.



Фигура 1. Постановка на правата и обратна гравиметрична задача

Решаването на обратната задача е базирано на решаването на съответните прави задачи. При нея по извършени наблюдения $Z(Q_i)$ на елементите на съответното поле следва да се определят източниците – смущаващите тела τ , които биха могли да създадат отчетените стойности (Зидаров, 1984). Решаването на обратната задача се заключава в различни вариации на параметрите на възможните източници – тяхното поставяне, разместване и изменение, докато създаденото от тях поле $Z'(Q_i)$ съвпадне с измереното $Z(Q_i)$. За целта е необходимо да се решава правата задача за всеки хипотетичен източник, резултатите за който да се анализират с оглед промяна на положението, количествените и качествените му характеристики за получаването на по-точен следващ модел. За гравиметричния случай стойностите на полето за пробните източници се определят с израза:

$$Z'(Q_i) = \left(\frac{\partial}{\partial Z} \int_{\tau} \frac{\rho(A) d\tau}{R(Q_i, A)} \right)_{Q_i} \quad (3)$$

1.3. ПРАКТИЧЕСКИ АСПЕКТИ НА ПРОБЛЕМА

От гледна точка на изследванията, свързани с подземните води, инженерните работи и проблемите свързани с околната среда, карстовата среда се явява едно от най-големите предизвикателства (Chalikakis, 2011). Карстовите системи се характеризират със специфичен тип морфология, преобладаваща част от която е развита върху варовити скали, основно чрез

разтваряне. Структурата им е комплексна и свързаният функциониращ механизъм може да бъде силно хетерогенен. Това обуславя и разнообразния интердисциплинарен изследователски интерес. Типичните геоложки, хидрогеоложки и геоморфоложки проучвания осигуряват частична информация относно карстовото развитие, но не могат да определят вътрешната структура на карстовата система. Познаването на геометрията и структурата на различните ѝ части (епикарст, зони на инфилтрация, канали, кухни и др.) съдържа много неизвестни поради комплексната ѝ природа.

Геофизичните методи осигуряват полезна информация за карста под земната повърхност, в това число оценка на риска, изследване на подземните води и уязвимостта. Въпреки това, карстовите райони остават една особено сложна среда, изборът на наземен изследователски способ за която не винаги е ясен и прост, поради нейната непостоянност и непредвидими характеристики на целта. В зависимост от климатичните условия, оттичането, насищането и физичните или геохимични свойства на системата могат значително да варират.

Предвид комплексния характер на карстовата система са идентифицирани основните предизвикателства свързани с локализирането на кухни. В зависимост от тяхното разположение в карстовия район те могат да бъдат изпълнени частично или изцяло с въздух или вода. Съдържанието на кухините е ключово за физичните свойства, които са определящи при избора на изследователски подход.

Естествените кухни са разположени в среда, която често е със сложен характер, особено в условията на карбонатния карст. Те се образуват от химичното и физично взаимодействие на подземните води със скалата. В такива условия дори по-голям аномален обем за геофизичните методи, отколкото този на самата кухня. Това е от полза за локализирането, но все пак остават ограниченията поради размера на търсения обект и неговата дълбочина. Установено е, че ефективният геофизичен размер варира в зависимост от геоложката среда, но обикновено е по-голям от реалния размер на кухнята (Chalikakis, 2011). За установяване наличието на кухни под земната повърхност може да бъде приложено разнообразие от техники, като всички те са базирани на физичния контраст между търсения обект и обкръжаващата го скала

Геофизичният резултат зависи от размера на целта във взаимовръзка с дълбочината ѝ, както и контраста ѝ с обкръжаващата я скала (Chalikakis,

2011). Размерът на карстовите обекти обикновено е малък, с изключение на пещерите, които са по-големи, но често са разположени на по-голяма дълбочина. Геофизичните аномалии са в обратнопропорционална зависимост от разстоянието между точката на наблюдение и обекта – с нарастване на разстоянието, стойността на аномалията намалява. Методите са допълнително ограничени от избора на стъпка (разстояние между местата на наблюдение), дискретизираща полето, и тяхната сетивност в дълбочина.

Важно е да се има предвид, че ефективността на всеки метод е в тясна зависимост от наличието на седименти (Chalikakis, 2011). Тяхната плътност и консистенция (съдържание на глина, плътност, наличие на вода и т.н.) може значително да повлияе върху локализирането на целта наред с увеличаването на дълбочината. Наличието, дебелината и структурата на епикарстовата зона също е от голямо значение. За всяка задача се препоръчва използването на поне един метод, а комбинирането им е препоръчително винаги, когато се цели получаването на по-добър модел на карстовите обекти. От гледна точка на специфичните особености на всеки карстов район, приложимостта на всеки отделен метод варира. По тази причина предварителните проучвания на изследваната територия са силно препоръчителни за проверка на адекватността на избраните методи или техники. Категоричният отговор на въпроса къде, какво и колко е скрито под земната повърхност остава приоритет на сондажите, но екологичният фактор и икономическият интерес поддържат силен интерес върху усъвършенстване на индиректните геофизични способности.

1.4. ЗНАЧИМОСТ

В основата на силния изследователски интерес към локализирането на кучини, зародил се преди повече от половин век и с непрекъснато нарастваща популярност, стоят проблеми от най-различно естество. Основните направления, за които решаването на тази задача е от особена важност, са класифицирани в следните групи (Palmer, 2007):

- Водоснабдяване

Карстът покрива между 10 и 20% от земната повърхност и осигурява между 40 и 50% от питейната вода на планетата (Brinkmann, 2012), което обуславя наличието на много селища именно в районите на карстовите водоизточници. Това от своя страна поражда редица инженерни проблеми и

предизвикателства на средата, свързани с правилното експлоатиране и грижа за природния ресурс. Историята познава случаи, при които неточната, непълна и едностранна оценка на подземните резервоари довежда до трагични последици.

- Инженерни приложения

Проектите на строителните инженери могат да бъдат грандиозни, но са в тясна зависимост от стабилната основа. Карстът предлага сложни, рискови условия, които са предпоставка за поддаване на фундаменти, разрушаване на пътища или пропукване на язовирни стени. Локализирането на дълбочинно разположени кухини е важна задача в съставянето на карти за оценка на риска, особено в урбанизираните територии. Установяването на тяхното наличие под строителни площадки и населени места е ключово за много инженерни проекти. Ежегодно земните пропадания поради подземни кухини причиняват значителни щети навсякъде по света.

Основните геотехнически проблеми, породени от карста, попадат в няколко основни категории:

- Земни пропадания

Пропаданията на земната повърхност са най-популярният проблем, породен от наличието на дълбочинно разположени кухини. В масовите медии не липсват примери за погълнати сгради и разрушена инфраструктура от възникнали ями. Бързите промени в подпочвените води като, например, увеличаване или намаляване на водните нива, обикновено са причината за тях.

Един от най-драматичните примери на земни пропадания в историята е случаят на изпомване на вода от златна мина в Южна Африка, при което нивото на подземните води е понижено с няколко стотин метра (Palmer, 2007). В основата от доломит се образуват над 200 дупки с диаметър до 125 m и дълбочина до 100 m.

Някои пропадания са толкова изумителни със своя мащаб, че са намерили място в класацията „Топ 25 на най-впечатляващите земни пропадания на всички времена“ (Castillo, 2013). Част от тях са удивителни, огромни по мащаб природни феномени: депресията Катара с ширина 80 km и дължина 120 km, образувала се при пропадане до нивото на подпочвените води; Дяволската дупка в Тексас, САЩ е варовиков феномен с размери 12 x 18 m и дълбочина 122 – тя е естествен вертикален хабитат за около 3 млн. прилепа; „Небесната бездна“ в Китай е най-голямата яма в света с дължина

626 m, ширина 537 m и дълбочина между 511 и 662 m; „Голямата синя дупка“, част от Белизкия бариерен риф, е обявена за обект на световното наследство на ЮНЕСКО и е класирана под номер 1 в класацията. Други са не по-малко впечатляващи, но със своя негативен ефект: внезапно образувал се кратер в град Гватемала, погълнал 30-етажна сграда – двама души са загинали, а над 1000 са евакуирани; пропадане на магистрала в Манитоба, Канада с дължина 200 m до 8 m под проектното ниво, вследствие на продължителни дъждове; Монт Гамбие е град в югоизточна Австралия и е разположен в район с географски особености, включващи водни канали, пещери и вулканични скали – известен е още като „Градът на кратерите“, заради вулканичните си ями.

Наличието на статистическа информация за рисковите райони в исторически план е от съществено значение при прогнозирането и превенцията на евентуални бъдещи проблеми. Пещерните карти отразяват тяхната връзка с разпределението на ямите. Пещерите позволяват директно изследване на причините, които предизвикват земните пропадания (Palmer, 2007).

Естествени пещери във варовик обикновено са по-стабилни в сравнение с изкуствените тунели. Неформалните указания определят земната основа като сигурна при дебелина на слоя равна или по-голяма от ширината на пещерата (Waltham, 2003). Повечето от тях са на достатъчна голяма дълбочина, така че не представляват проблем за масовите инженерни работи. Потенциалният риск е от плитко разположени кухни с големи размери. В умерените региони характерни са пещерните пасажи с размер под 10 m, докато във влажните тропици те достигат до 30 m.

○ Течове на резервоари и тунели

Протичането на резервоарите е друг типичен за карста проблем. Язовирната конструкция поражда изключителни натоварвания, които водят до нестабилност на основата, пропукване на скалата, подземна ерозия и ускорено разтваряне (Palmer, 2007). Голяма част от построените върху карст резервоари протичат, а някои от тях не се запълват с вода изобщо.

Най-високите регистрирани стойности на течове са 26 m³/сек. при турския язовир Кебан и 25 m³/сек. при черногорския Вратач (Milanovic, 2004). По време на строителството на Кебан, около 30 пещери са запълнени с блокове от основната скала, пясък и глина, като ефектът от това обаче е малък.

Язовирът Анкор в северозападен Уайоминг, САЩ е съоръжение, създадено по време на бум в язовирното строителство през 50-те и 60-те години на ХХ век (Jarvis, 2003). Построен върху варовиков карст, при неговото завиряване започват да се образуват големи по размер земни пропадания под и около него. При най-голямата депресия е изградена дига, намалявайки 55% от неговия капацитет. Въпреки десетилетията посветени на скъпи проучвания за подобряването му, продължаващото изтичане не позволява резервоарът да достигне дори малка част от редуцирания капацитет.

Направленията, по които се развиват пещерите, могат да послужат при прогнозирането на евентуални течове в резервоарите (Palmer, 2007). За оценката на този проблем е необходимо да се познава механизмът, по който се формират пещерите в разтворимите скали. Особено високи стойности на разтварянето се достигат в момента, когато започва завиряването. Увеличеното налягане при язовирите допринася за премахване на натрупаните седименти в съществуващи подземни канали. Дори когато каналите се увеличат съвсем малко, потокът през тях значително нараства.

През 30-те години на ХХ век Управата на Долината Тенеси (федерална институция, собственост на държавата) извършва множество сондажи в басейна на реката в югоизточната част на САЩ на места, предвидени за язовирно строителство (Palmer, 2007). Голяма част от тях са в карбонатни скали. За да документира наличието на подземни речни канали, получени при разтварянето на скалите, са изследвани сондажните резултати, както и пещерите с пряк достъп посредством пробиви с голям диаметър. Регистрирани са хиляди кухини, някои от които до 68 m под речното ниво с височина до 20 m.

Повечето от кухините отвеждат значителни количества вода. Детритните седименти запълват изцяло или частично някои кухини с размери на зърната от глина до големи скални блокове. Няма ясна зависимост между седиментното запълване и дълбочината на кухината, но сондажите показват, че с увеличаване на дълбочината броят на кухините намалява. Най-големите и многобройни отвори на площадките на УДТ са над речното ниво, а тези под него се съгласуват с концептуалните модели на пещерно развитието.

През 1973 г. в експлоатация влиза воден резервоар на река Болюнчица на територията на полуостров Истрия, Хърватия. Карстовата основа предизвиква дотолкова големи загуби, че първоначалните намерения за

използването му за напояване се оказват неосъществими. В периода 1977-2005 г. средният годишен обем едва достига 8% от пълния капацитет (Bonacci, Rubinic, 2008). При всяко негово запълване водата се просмуква в множеството нови дупки, отворили се в седминетния слой. Подобен е и проблемът с резервоара Ричице, Хърватия, изграден върху динарски карст (Bonacci, Roje-Bonacci, 2008).

Тунелното строителство също е повлияно. Между 1984 и 1993 г. са конструирани 31 km тунели на дълбочина 80-100 m в силурския ниагарски долomit под Миуоки, щата Уисконсин като част от програма за намаляване на замърсяването (Palmer, 2007). Свързаните с карста усложнения обаче превишават бюджета с 50 млн. долара и довеждат до приключване на проекта със закъснение от 9 месеца.

Запушването на карстовите канали изисква значителни по мащаб дейности, а капсуловането на всички тях на практика е невъзможно. Равносметката е, че всички ползи от създаването на такива съоръжения върху подобни карстови системи се обезценяват от загубите заради борба с течовете.

○ Неравна скална основа

Там, където скална основа е покрита само от почва или неконсолидирани седименти, нейната повърхност може да бъде доста неравна. Тези свойства са характерни за епикарста (Palmer, 2007). Цепнатините, тънките зъбери и нестабилните скални фрагменти са типични. Често е трудно да се намери стабилна основа за изграждането на фундаменти на сгради, мостове и други носещи конструкции. Може да се наложи мащабно циментиране или полагането на дебели бетонни плочи.

Пътното проектиране е особено сложно поради присъщата нестабилност на терена, големите количества изкопи и насипи, плиткоразположени кухини и други проблеми (British Columbia, 2003). В доклад на (Powers, 2003) специфичните обекти на проучване при преустройството на щатската магистрала 128 в Ню Мексико са класифицирани на база снимки, топографски карти и теренни данни в шест основни групи. Една от тях са пещерите – в непосредствена близост до трасето са открити пет с по-големи размери (позволяващи директен достъп) и съответно са обект на по-задълбочен анализ.

Във варовиковия регион Крас², Словения са открити над 350 пещери под 70-километрова магистрална конструкция (Knez, 2012). Познаването на особеностите на повърхността и подземната структура спомага за своеобразното предсказване на формата и типа на пещерите и пещерните системи в района. Това от своя страна очертава насоки при бъдещото планиране на трасета, като приоритетите включват избягване на определени карстови обекти както от гледна точка на рискове за конструкцията, така и за опазването на пещерите и карстови водоносни хоризонти.

- Изолация на складове за отпадъци

Мненията за и против съхранение на отпадъчни материали в карстови райони са доста противоречиви. Някои геолози смятат, че такова хранилище има потенциал от протичане (Palmer, 2007). Определяни като нестабилни, все пак карстовите хранилища се считат за най-добрата среда за съхранение на отпадъци. Евапоритните скали, каквито са солта и гипсът, могат да бъдат подходящи за съхранение на отпадъци дълбоко под земната повърхност, където те проявяват пластични свойства и импрегнират всички останали дупки. Заради налягането дълбоко под повърхността, пукнатините са рядкост, а изкуствените тунели бързо се затварят. Познаването на карстовата среда е от съществено значение за проектиране на хранилища в такава среда.

Дори в некарстови зони, директните проучвания в пещерите са от съществено значение за оценка на тяхната пригодност за съхранение на отпадъци. За хранилището на ядрени отпадъци в планината Юка, щата Невада на база минерализацията в жилите е съставена хипотезата, че разломите областта са се активизирали на няколко пъти в миналото (Dublyansky, 2005). Това поставя въпроса дали мястото осигурява адекватни условия за изолация в дългосрочен план.

- Земеустройство

Ефективното земеустройство в карстови райони изисква специално внимание върху дренажните проблеми и почвената ерозия (Palmer, 2007). Обикновено почвите над карст са тънък слой и имат нисък капацитет на инфилтрация. Почвената ерозия може да е сериозна по стръмните склонове, които се отводняват в цепнатини и въртопи. Голямо количество почва се транспортира като седимент през пещерите, появява се при изворите и се

² Понятието „карст“ всъщност е германизиран вариант на името Крас (Williams, 2011)

отнася от повърхностните реки. Мътността на изворите и пещерните води по време на наводнения е показател за мащаба на този проблем. По тази причина предпазните мерки като терасиране, контурна оран и насаждения са от особено значение при карста.

Карстовите почви рядко са избирани за септични ями (Palmer, 2007). За да бъдат ефективни, те трябва да разполагат с поне метър средно промокаема почва за дрениране. По този начин отпадните води се аерират и филтрират. Тънките, ниско промокаеми почви, типични за карста, обаче не са задоволителни. Замърсените води могат да се излеят в отворени цепнатини без почти никакво филтриране, заразявайки пещерните течения със слабофилтрирани отпадъци.

Някои типове карст са крехки и податливи на необратими нарушения. Изсичането на гори в Югоизточна Аляска заплашва целостта на местната карстова система със запушване на пещери и повърхностни цепнатини с останките от падналите дървета (Schulte, 1998). Тяхното съхранение е важно за водните системи, животинския хабитат и съхранението на археологически артефакти.

1.5. ОБОБЩЕНИЕ

За изучаване на подземния геоложки строеж и ресурси геофизичните методи осигуряват широко и бързо пространствено покритие, ниска цена и бърза интерпретация на данните. Индиректният им способ обаче обуславя нееднозначност в решението на проблема, чиито практически аспект е затруднен допълнително от специфичните условия на изследваната територия.

Със значимите проблеми, които пораждат, и същевременно уникален характер, изключително предизвикателство пред учените се оказват комплексните карстови структури, а кухините са се обособили като най-популярен обект на изследователски интерес. От основно значение е определянето на тяхното разположение, възможностите за пряк достъп, както и размерите им в съотношение с тяхната дълбочина.

2. НЕРЕШЕНИ ПРОБЛЕМИ – ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА МЕТОДА

Съвременните техники за изследване на карста включват непосредствено проучване и картиране на пещери, геофизични методи, картиране на повърхността и моделиране (Но, 2011). Използването на ГИС (географски информационни системи) като средство за анализ също се очертава като тенденция в изучаването на карста (Славова, 2017).

По целия свят геофизичните методи са широко разпространени в инженерните, хидрогеоложки и други изследвания на различни геоложки образувания, но не са систематично прилагани в изследванията на карстови системи. Въпреки проведените до момента изследвания, все още липсва стандартна, качествена техника за установяване наличието на кухини, поради което тяхното локализиране продължава да бъде предизвикателство.

Оптималното решение на класическия проблем на обратната задача е обусловено от избора на адекватен геофизичен метод. Досегашният изследователски опит и технологичното развитие в областта са решаващ фактор, а специфичните характеристики и текущото състояние на избраната технология са в основата на нейното подобрене.

2.1. ИСТОРИЧЕСКО РАЗВИТИЕ НА ПРОБЛЕМА

Проведените и публикувани до момента изследвания трудно могат да бъдат обект на сравнение и критика поради разнообразния характер на отделните карстови системи (Chalikakis, 2011). Със сигурност част от тях са извършени и преди технологичното осъвременяване на оборудването и софтуера, ограничаващи качеството на резултатите. Систематизирането на тези изследвания обаче, идентифициране на основните карстови проблеми и обобщаване на предимствата на всички налични наземни геофизични методи е от полезно за предварителната методологична подготовка, развитието и подобряването на резултатите от бъдещите изследвания върху карстови райони.

Геофизични методи за изследване и оценка на геотехнически проблеми, свързани основно с наличието на кухини, пропадания и епикарстови структури, се прилагат от 60-те години на XX век (Chalikakis, 2011). До началото на 90-те години обаче са документирани едва малка част от извършените работи. Сред използваните техники за установяване на

2. Нерешени проблеми – възможности за оптимизиране на метода

кухни са тези базирани на електрическото съпротивление на средата, гравиметрията и сеизмичните методи.

От началото на 90-те години на ХХ век в геофизичните проучвания започват силен подем, дължащ се на технологичното развитие, по-ниските цени, опростени теренни работи и по-бърза интерпретация на данните (Chalikakis, 2011). За нарастващия интерес допринася силната взаимовръзка между наличието на подземни кухни, изоставени тунели и други подобни обекти, от една страна, и околната среда, инженерните дейности, археологията и други науки, от друга. В началото на новия век редица изследователи и организации посвещават време и усилия в изучаване обхвата и комплексния характер на проблема, който карстът поставя пред строителните инженери.

През последните две десетилетия усилията се насочват в изготвяне на методически указания за изследванията на карстови системи. Първите опити за оценка на възможностите за приложение на геофизичните методи върху карст дават ценни насоки в епохата на стремглаво развиващи се технологии и установяване на нови стандарти (Hoover, 2003). Извършват се съпоставки между различни технологии, а като основен обект на изследователския интерес се очертава локализирането на кухни.

От 90-те години на ХХ век досега са документирани редица геофизични наблюдения в различни части на света. Изследванията са извършвани както в реални, така и в лабораторни условия, с различни технологии за локализиране на кухни наред с други сходни геофизични цели. При повечето се прилат по няколко метода с цел сравнение на предимствата на всеки от методите и подобряване възможностите за интерпретация.

Едно от ранните комбинирани изследвания за локализиране на кухни включва гравиметрични и георадарни наблюдения, реализирани в рамките на проект за високоскоростна железопътна линия между Мадрид и Барселона (Benito, 1991). Двата метода са избрани, тъй като по-ранните сеизмични и електрически изследвания в района не осигуряват надеждна информация за наличието на кухни под земната повърхност. Данните от тях са допълнени с въздушни снимки, направени през няколко десетилетия, с цел проследяване развитието на земните пропадания на повърхността.

В последните години няколко геофизични метода и техники за оценка се развиват с бързи темпове. През 2001 г. е публикувано изследване с

георадарни (GPR – Ground Penetrating Radar) и гравиметрични измервания за картиране на плиткоразположени подземни кухни в западна Швейцария (Beres, 2001). През същата година в друга публикация е представено гравиметрично изследване за локализиране и мониторинг на кухни в района на Мъртво море (Ryabakov, 2001). Гравиметрични, магнитни и GPR изследвания довеждат до успешно локализиране на карстови кухни в областта на Сарагоса, североизточна Испания (Mochales, 2008). Още комбинации са включени в изследванията на (Martinez-Moreno, 2013; Brown, 2011; Abt, 2011; McGrath, 2002; Happer, 1999; Lange, 1999). Георадарни методи са използвани и у нас за локализиране на кухни (Русев, 2014).

Съпоставката между отделните методи постепенно отвежда изследователските тенденции в посока прилагането на мултисензорни системи. Комбинацията от различни геофизични технологии представлява своеобразно въвеждане на допълнителни ограничаващи условия в нееднозначното решение на обратната задача, което индиректните проучвателни методи предлагат. Особено популярен интегриран подход съчетава гравиметрия с георадарни и магнитометрични изследвания. Интересни резултати представя един наскоро публикуван сравнителен анализ между тях (Erkan, 2011). От една страна, са потвърдени качествата на мултисензорната система за плитки приложения, от друга, георадарните и магнитометрични методи проявяват противоречиви качества и рязко понижаване на възможностите с промяна на средата (варовик, пясъчник, глина, почва) и дълбочината.

В практиката се разграничават различни видове кухни според тяхното съдържание, тъй като то има съществено значение за приложимостта на един или друг геофизичен метод. За търсене на сухи кухни са използват още методи като електро-резистивна томография (ERT – Electrical Resistivity Tomography), микровълнова томография, сеизмични методи и др. За изпълнени с вода кухни приложение намират както посочените по-горе GPR, ERT и сеизмични методи, така и други като магнитно-резонансна томография, например. Публикацията (Pivetta, 2024) разглежда как гравиметрични и хидроложки данни могат да се използват съвместно за по-добро разбиране на хидродинамиката на карстовата система.

2. Нерешени проблеми – възможности за оптимизиране на метода

В Таблица 1 е представена адекватността на различните наземни геофизични методи за локализирането на карстови кухини. С оценка от 0 до 3 са означени съответно от неподходящи до препоръчителни; за някои методи стойността е интервална, поради разнообразието от техники, които спадат към тях. Под препоръчителен метод (3) се разбира такъв, чиито резултати са релевантни за проблема и дори може да бъде прилаган самостоятелно за характеризиране на обекта; подходящият, но непълен метод (2) осигуряват добри резултати, но обикновено се прилага в комбинация с друг метод за осигуряване на конкретна интерпретация на данните; подходящ, но ограничен (1) е този метод, който е оправдал своята приложимост едва в някои изследвания и то в комбинация с други методи; неподходящият метод (0) не е адаптиран за геометрията и физичните свойства на целта. В таблицата са представени още оценка на стойността на метода и оптималният брой оператори.

Таблица 1. Адекватност на наземните геофизични методи за изследване на кухини (Chalikakis et al., 2011)

| Метод | Адекватност за кухини | | | | Други | |
|-----------------|-----------------------|--------|---------------------|--------|-------|----------------|
| | Със седиментен слой | | Без седиментен слой | | Цена | Брой оператори |
| | С въздух | С вода | С въздух | С вода | | |
| Електрически | 0-2 | 0-2 | 0-3 | 0-2 | 1-3 | 2-3 |
| Електромагнитен | 0-1 | 0-1 | 0-3 | 0-2 | 2-4 | 2-3 |
| Сеизмичен | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2-3 |
| Гравиметричен | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| Магнитен | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| MRS | 0 | 3 | 0 | 3 | 5 | 2 |

Адекватност: 3 - препоръчителен; 2 - подходящ, но непълен; 1 - подходящ, но ограничен; 0 - неподходящ

Стойност: 1 - 5 съответно за минимална - максимална цена

В практиката се счита, че комбинирането на различни геофизични техники дава по-добри резултати от повишаването на точността на един метод, прилаган самостоятелно. С въвеждането на допълнителни технологии обаче значително се увеличава цената на изследването, включващо скъпи технически средства, специалисти и допълнителен обем работа по планирането на отделните наблюдения, тяхното извършване, обработка и анализ. От икономическа гледна точка рационално решение е изборът на определен метод с доказани предимства съобразно поставената

цел, чиито възможности бъдат оптимизирани посредством цялостния работен процес.

В Таблица 1 се отличава гравиметрията с много добри възможности, независимо от специфичните условия, които за останалите методи често представляват ограничение. Това обособява гравиметрията като универсално средство за локализиране на кухини. Неограничената ѝ чувствителност в дълбочина, доколкото параметрите на изследвания обект и средата го позволяват, категорично затвърждава водещата ѝ позиция в списъка на подходящите за целта геофизични методи.

2.2. ОСНОВНА ТЕОРИЯ

Гравитационният метод е една от най-старите методологии (Кири, 1988), който, както подсказва името му, отчита вариациите в земното гравитационно поле, породени от разпределението на масите. При този тип проучвания геоложкият строеж на Земята се изучава по вариациите на земното гравитационно поле, изразени в различните плътности на горната скала.

Разликите в плътността на изследваната област са единственият значим фактор. Основно понятие е аномално тяло, което представлява самостоятелен блок, отличаващ по своята плътност се от обкръжаващата го скала. Тази област от геоложкия разрез има аномална маса и предизвиква аномално изменение на гравитационното поле, наречено гравитационна аномалия. Голямо количество геоложки ситуации водят до възникването на маси, причиняващи гравитационни аномалии със значителна стойност. Интерпретацията на гравитационните аномалии позволява да бъдат получени оценки на дълбочината и формата на телата.

В основата на гравиметричните проучвания е Законът на Нютон за всеобщото привличане (Кири, 1988). Той гласи, че силата на привличане F между две тела с маси m_1 и m_2 , чиито размер е пренебрежимо малък по сравнение с разстоянието r между тях, се определя по формулата:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (1),$$

където $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ е гравитационна константа.

Ако Земята бъде разглеждана като кръгло, еднородно и невъртящо се тяло с маса M и радиус R , а на повърхността ѝ е разположена малка маса, то лесно може да се докаже, че масата на сферата действа така, както би било,

ако е концентрирана в центъра на сферата. Тогава формула $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ (1)

добива вида:

$$F = \frac{GM}{R^2} m = mg \quad (2),$$

където g е гравитационно ускорение или още сила на тежестта, както е прието да се нарича в практиката на гравиметричните изследвания.

На такова тяло силата на тежестта би трябвало навсякъде да е една и съща. Заради неправилната форма на Земята, нейното въртене, релеф и нееднородно разпределение на масите обаче на повърхността ѝ силата на тежестта има различни стойности.

Естествените или изкуствените кухини под земната повърхност, изпълнени с въздух (с пренебрежимо малка плътност) или друго съдържание, се характеризират с плътностен контраст спрямо обкръжаващата ги среда. Вертикалното привличане на тези маси е подчинено на Нютоновия закон и поражда разлики в гравитационните стойности.

За илюстриране на гравитационния ефект от подземна кухина често се допуска предположението, че тя е с цилиндрична или сферична форма (Chico, 1964). В първия случай, максималната стойност на силата на тежестта може да се даде с простото уравнение за заровен хоризонтален цилиндър, чието привличане е разпределено по дължината на неговата ос:

$$g_{(\max)} = 0.01277\rho \frac{R^2}{Z} \quad (3),$$

където ρ е плътностна разлика между кухината и средата, R е радиус на цилиндъра, Z е дълбочина от повърхността до центъра на цилиндъра, а $g_{(\max)}$ е максималната сила на тежестта в $mGal$.

В случая на заровена сфера (или друго еквидименсионално тяло), гравитационното ѝ привличане е съсредоточено в нейния център, а максималната сила на тежестта се изчислява по формулата (Chico, 1964):

$$g_{(\max)} = 0.0852\rho \frac{R^3}{Z^2} \quad (4)$$

Горните уравнения представят теоретичните стойности на диференциалното гравитационно привличане на цилиндър или сфера и е необходимо да бъдат внесени допълнителни корекции, които са стандартна част от обработката на гравиметричните данни (Chico, 1964).

С възможностите на съвременната изчислителна техника, моделите на аномалните обекти добиват все по-сложен вид (Цанков, 2013) и

същевременно все по-лесни за приложение (Butler, 2012). Горните две формули обаче ясно и просто илюстрират ефективността на гравиметричните методи, обусловена от формата, размерите и дълбочината на тяло при определена плътностна разлика. Параметрите на изследвания обект са в основата на избора на конкретен гравиметричен подход.

2.3. ГРАВИМЕТРИЧНИ МЕТОДИ

Специфичните качества на гравиметрията намират своето силно приложение за решаването на задачи от различни области и мащаб. Гравитационните методи са широко и рутинно прилагани в геофизиката, геодезията, геодинамиката, геологията, минералните и нефтени проучвания, както и в инженерните дейности. Във времето гравиметрията се утвърждава като водещ подход за локализирането на пещери, изоставени тунели, бункери, крипти и други подземни обекти, а класическите методи се допълват от нови, съвременни тенденции.

Модерните гравитационни изследвания водят началото си от първата третина на XX век (Nabighian, 2005). В зората на XXI век натрупаният опит дава възможност за обобщение на най-добрите практики в областта на гравиметричните изследвания. 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 определянето 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. В обобщено издание на Канадската минна асоциация от 2012 г. за топ 100 на иновациите в минното дело за първото десетилетие на XXI в. (Minalliance, 2012), под номер 13 се нарежда въздушната гравиметрия. За сравнение на по-предни позиции в категорията изследвания са класирани софтуерните средства за обработка, анализ и визуализация на данните, ГНСС (глобални навигационни спътникови системи), а следващи са методи като лидар (LiDAR – Light Detection And Ranging), 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, методът се прилага успешно за локализиране на обекти под земната повърхност.

Специално внимание на въдушните и още повече космически гравитационни методи отделят организации като НАСА (NASA) и Министерството на отбраната на САЩ (Department of Defense - DoD). Целта на вторите е локализиране на кухни като потенциални обекти на вражески организации от безопасно разстояние (Streland, 2003). Фокусът на спътниковата гравиметрия за целите на геофизиката и геодезията обаче е върху проследяване на времевите вариации на земното гравитационно поле, осредната му стойност и създаването на глобални и регионални модели (Кооп, 2007). За масови приложения, изискващи висока точност и резолюция, наземни методи запазват своите безпрецедентни възможности.

През XXI в. гравиметричните методи вече намират широко приложение в редица области. Сред най-популярните са изследвания на карстови системи (Chalikakis, 2011), вулканични структури (DeNosaquo, 2009), геодинамика (Toushmalani, 2010; Imanishi, 2009; Pacheco, 2006; включително и у нас: Михайлов, 2006; Ценков, 2006), хидрогеология (Wilson, 2012), проучвания за полезни изкопаеми (Nabighian, 2005) и др. Съвременна и изключително перспективно направление се очертава в областта на археологическите проучвания (Pasteka, 2019; Padin, 2011; Erpelbaum, 2011; Panisova, 2009). В друга част от изследванията значението на гравиметричните измервания е с акцент върху проектирането, изграждането, поддръжката на инженерно-строителни съоръжения (Deroussi, 2009); (Mickus, 2003) и управление на риска в карстовите райони (da Silva Junior, 2006).

(Saddek, 2017) разглежда използването на микрогравиметрично проучване за идентифициране на рискови зони от срутване в карстов район близо в Североизточен Алжир. След срутвания на земната повърхност през 2001 г., които са довели до образуване на големи понори, е извършено детайлно гравиметрично изследване на площ от 14 700 m² чрез 614 измервателни точки. Използвана е микрогравиметрия – неинвазивен метод, който засича гравитационни аномалии, причинени от подземни кухни с пониска плътност. Изследването на (Saibi, 2019) е насочено към откриване на подземни кухни и карстови структури в района на град Ал Айн в Обединените арабски емирства, които представляват сериозна заплаха за строителството поради възможността за пропадания и слягания на земната повърхност – чрез високоточни микрогравиметрични измервания,

извършени в 452 точки върху площ от около 1600 km², учените използват метод на инверсия за създаване на 3D модел на разпределението на плътността на подземните скали до дълбочина от 1500 метра. (Qiao, 2025) разглежда използването на технологията за измерване на гравитационен градиент като ефективен метод за изследване и откриване на подземни пространства в градски условия. Изполването на гравиметрични методи в градска среда е и обект на изследванията на (Bouyahiaoui, 2025), (Bouyahiaoui, 2024), както и на (Carbone, 2020).

Интересна тенденция се очертава в изследването на времевите вариации в условията на средата – за мониторинг на подземните води (Davis, 2008; Masson, 2012; Jacob, 2009; Jacob, 2008) и дори за предсказване на вулканични изригвания, асоциирани с гравитационни изменения породени от движението на магмата (Berrino, 2006). Подобен род наблюдения са от значение както за по-пълноценното опознаване на протичащите процеси, така и за оценка на факторите, които чиито ефект следва да бъде отстранен в прецизните гравиметрични изследвания за други цели.

В инженерната геология стандартните гравиметрични методи намират приложение рядко заради обикновено ниската им точност. Специалните микрогравиметрични изследвания обаче се използват за установяване на подземни кухини, в това число естествени зали и галерии, минни изработки, археологически обекти, водни обеми и други. За проучвания на пещери микрогравиметрия се прилага от 40-те години на XX век (Hall, 2003). Методът осигуряват данни с висока точност и резолюция. Тези особености обуславят използването на прецизна апаратура за гравитационните и пространствени определения в ограничени по площ територии.

2.4. ИЗМЕРВАНЕ НА СИЛАТА НА ТЕЖЕСТТА

Понятието „сила на тежестта“ по същество се явява ускорение, поради което неговото измерване е необходимо да включва определяне на дължини и времена. Такива относително прости измервания обаче се оказват нелесно изпълними с необходимата за гравитационните изследвания точност.

Средната стойност на силата на тежестта на повърхността на Земята е приблизително 9.8 m/s². Мерната единица на гравитационните измервания е “Gal”, който е еквивалентен на силата, която би предизвикала единица маса да бъде ускорена с 1 cm/s². Гравитационното ускорение на земната повърхност е приблизително 980 Gal. В гравитационните изследвания могат да бъдат регистрирани вариации от порядъка на една десетмилионна

2. Нерешени проблеми – възможности за оптимизиране на метода

земното поле с помощта на гравиметри. По тази причина най-често използваната в практиката на гравитационните изследвания мерна единица е милигал ($1 \text{ mGal} = 1.10^{-3} \text{ Gal}$) и дори микрогал ($1 \mu\text{Gal} = 1.10^{-6} \text{ Gal}$).

Портативните гравиметри за наземни измервания датират от 50-те на XX 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 (LCR) G, който се превръща в индустриален стандарт за цели три десетилетия. С някои подобрения през 1967 г. се появява LCR D, осигуряващ точност от 0.005 mGal. Двата модела притежават обаче и някои недостатъци, а популярността им се дължи до известна 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 гравиметричните методи за локализиране на кухини за целите на строителство в карстови райони и изоставени мини, като естествени резервоари в хидрогеологията, антропогенни структури в археологията и други задачи вече са ясно дефинирани с термина микрогравиметрия. До този момент използвани за целта са инструментите LCR. Те 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).

Във всички изследователски направления метрологичната еволюция следва обратнопропорционална зависимост от опита на оператора за повишаване прецизността на измерванията. Интегрирането на модерни техники за електронни измервания, обработка на сигналите и съхранение на данните са 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 LCR 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 със своята точност 0.005 mGal 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. 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 сондажен гравиметър с малък размер (първият сондажен гравиметър е модел на LRC от 50-те години на XX в.) – за диаметър до 48 mm, дълбочина 2 000 m и точност 5 μ Gal, който тя създава през 2005 година (Seigel H. O., 2009; Seigel H. O., 2007). 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 тяхната реализация. Високата чувствителност на метода създава логистични проблеми, свързани с точни пространствени (височинни) определения, работа в „тиха“ от гледна точка на фонові вибрации среда, стабилност на инструмента и други.

2.5. ТЕХНОЛОГИЯ

Основна причина за избор на гравиметричните методи за локализиране на кухини е физичният принцип, на който са основани. Тъй като уредите са чувствителни на силата на тежестта, различната плътност, която притежават аномалните тела спрямо средата, в която се намират, ги прави различни за метода. Те се характеризират с още няколко важни предимства:

- Полската работа може да се извърши от един до няколко души във всяка достъпна област, включително високо урбанизирани и индустриализирани зони, над различни терени, настилки, в сгради и т.н.
- Инструментариумът е портативен, работата е тиха и не предизвиква нарушения на средата с изключение на маркиращите станции.

2. Нерешени проблеми – възможности за оптимизиране на метода

- Методът има добро площно покритие. Резултатите, представени като карти с изолинии, имат значително предимство пред данните в отделни точки или по дължините на профили.

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

За съставянето на пълноценен работен план е необходимо да се вземат предвид и няколкото ограничения на метода, които в контекста на микрогравиметрията имат още по-осезаем ефект (Department of Environmental Protection, 1994):

- Приложенията са ограничени до изследване на плътностно-обособени обекти;
- Необходимо е точно пространствено определение на станциите;
- Сложният терен и условия на работа, както и комплексната геоложка основа могат съществено да редуцират точността на работа;
- Необходимост от допълване с информация от оголвания, сондажи, сеизмични профили и други данни.

Според (Jacob, 2020) кухини, разположени по-близо до повърхността, генерират по-силни гравиметрични сигнали, докато дълбоките кухини са по-трудни за откриване, особено ако са с малки. Формата на кухината също оказва влияние – сферичните и хоризонтално разположени кухини се откриват по-лесно от вертикални или неправилни форми. Допълнително, авторите установяват, че при по-редки измервателни мрежи съществува риск от пропускане на аномалии или неточното им локализиране.

Изследването заключава, че за постигане на надеждни резултати при използване на микрогравиметрия е необходимо внимателно планиране на мрежата от измервания, избор на подходяща плътност на точките и предварително моделиране на очакваните геоложки условия. Представените числени модели служат като полезен инструмент за оптимизация на теренни проучвания и повишаване на ефективността при търсене на кухини в геоинженерни, строителни и археологически приложения.

Посочените фактори не намаляват положителните качества на избрания метод, тъй като тяхното влияние може да бъде редуцирано с

2. Нерешени проблеми – възможности за оптимизиране на метода

взимането им под внимание при организацията, реализацията и обработката на измерванията, посредством съответните предложения:

- Ограничената чувствителност на метода до плътностно-контрастни обекти го прави идеален за локализирането на кухини и същевременно нечувствителен за разнообразните, често непознати условия на средата (каквото е, например, типичното за карстовите системи наличие на глина, блокиращо георадарните технологии). Докато другите методи имат спорни качества при промяна на условията, гравиметрията запазва своята надеждност.
- В общия случай съвременните ГНСС средства позволяват пространствени определения на точките с необходимата за микрогравиметрия точност в реално време сравнително лесно дори без намесата на специалист. Въпреки това специфичните условия на средата могат да създадат затруднения, поради което геодезическият подход при извършването и обработката на данните е желателна, а понякога и задължителна.
- Трудните условия и комплексната геоложка основа са фактори, които не могат да бъдат избегнати при работа на терен. Тяхното влияние обаче може да бъде намалено посредством подходяща обработка и анализ. В книгите тези два етапа са систематизирани и разгледани подробно като стандартната обработка е разширена с разнообразни предложения за допълнителни изчисления, които да подобрят възможностите за анализ на данните.

Преобладаваща част от документираните геофизични изследвания обаче са сравнително еднообразни по отношение именно на обработката, което може да се обясни с посоченото в точка 2.1. историческо развитие и съвременните тенденции за комплексна интерпретация на мултисензорни данни. Едва малка част от тях включват изравнение на гравиметрични измервания (Ламбева, 2015; Escobar, 2013; Иванова, 2005; Hwang, 2002), което от геодезическа гледна точка е задължителен етап за получаването на точни, хомогенни и надеждни резултати.

Теоретичните постановки приписват съществени качества на филтрацията на данните за подобряване на тяхната интерпретация (Apell, 1979). В практиката приложение намират различни методи (Reci, 2011 Alp, 2011; Martin, 2011; Corchete, 2010; Kadirov, 2000), като

с тях обикновено се цели отделяне на регионалния фон, грешки от различен характер или друго влияние.

- Събирането и систематизирането на наличната информация е от съществено значение при избора на метод и неговата реализация. Калибрирането с резултати от други геофизични изследвания и с непосредствени данни за изследвания обект са особено важни и биха могли да допринесат съществено за създаването на точен модел и коректна интерпретация на резултатите от наблюденията. В практиката до момента тази концепция ясно присъства в мултисензорните системи, от една страна, и сондажите, от друга. Тъй като средата в даден район притежава сходни характеристики, идеята би могла да се разгърне от гравиметрични наблюдения върху познат обект към неизследвани територии в рамките на територията с общи физико-геоложки свойства.

Интересен пример в тази посока е една публикация от 1984 г. (Butler D. K., 1984), в която техники на филтрация са комбинирани с гравиметрични наблюдения над известна пещера и сондажи. Анализът и интерпретацията на резултатите са извършени в контекста на карта с планов изглед и вертикални разрези на пещерата, което значително ограничава информацията за обекта. Представянето на данните в този вид е обвързано както с измервателните уреди, така и с възможностите за тяхната обработка и визуализация.

В последните години средствата за събиране, обработка и анализ на пространствени данни за пещерите подлежат на сериозно преразглеждане и обновяване (Slavova, 2012). Крайният резултат от измерванията са тримерни цифрови модели (Slavova, 2013; Paul, 2013), които носят богата информация за пространствените параметри на изследваните кухини.

Формираното мнение относно актуалното състояние на проблема и потенциала му за развитие е основано на документирани множество изследвания, проведени в Австралия, Испания, Франция, САЩ, Турция, Израел, Япония и др. Теоретичните основи, технологичният ред и приложните области на гравиметричните методи са подробно представени в редица книги от миналото (Голиздра, 1988 ; Любимов, 1988 ; Кири, 1988; Веселов, 1986; Зидаров, 1984; Юзефович, 1980; Стойнов, 1974 ; Успенский, 1968; Макаров, 1968), преразгледани в нови, съвременни материали

(Hofmann-Wellenhof, 2005; Murray, 2001; Wahr, 1999; Siegel, 1995; Department of Environmental Protection, 1994; Heiskanen, 1993) и подробни изследователски доклади (Scheirer, 2008; Fugro Ground Geophysics, 2005).

В контраст с приложението на гравиметричните методи за решаването на локални задачи по света, в България такъв тип изследвания се извършват едва през последните десет години в отделни случаи за локализиране на разломни структури, свлачищни процеси (Господинов, 2009) и минерални находища. За локализиране на кухини гравиметрични методи у нас са прилагани в няколко изследвания, представени в публикациите (Slavova, 2018), (Славова, 2016), (Slavova, 2016), (Славова, 2015) и (Nikolova, 2023).

2.6. ОБОБЩЕНИЕ

Осъзнатата значимост на проблема, свързан с локализирането на кухини, от една страна, и технологичното развитие, от друга, обуславят неговото интензивно развитие през годините. Съпоставката между различните геофизични подходи постепенно отвежда тенденциите в посока прилагането на мултисензорни системи за ограничаване нееднозначността в решението на обратната задача. Същевременно изборът на единствен метод е икономически най-изгодното решение, а теоретичната основа и изследователската практика утвърждават гравиметрията като универсално средство за целта.

Необходимостта от точна и детайлна информация за сравнително малките по размер кухини обуславя прилагането на микрогравиметрични изследвания. Методът притежава някои ограничения, чиито ефект може да бъде редуциран посредством набавянето на допълнителна информация за района и изследвания обект. Съвременните технологии също спомагат за лесни и точни пространствени данни за станциите. Високата чувствителност на метода обаче го прави силно зависим от теренните условия. Тъй като те не подлежат на промяна, тяхното влияние следва да бъде редуцирано посредством оптимизация в процеса на обработка, анализ и интерпретация.

3. ОПИСАНИЕ НА ВЪЗПРИЕТИЯ МЕТОД (ТЕХНОЛОГИЯ) – МОТИВИ И АРГУМЕНТИ

За постигане на поставената цел е необходимо да се планира и реализира цялостен работен процес. Задължително е поставянето на ясни критерии още преди началото на теренните измервания, според които те да бъдат реализирани, така че последващата обработка да доведе до оптимални резултати.

Утвърдилата се във времето изследователска практика следва определен технологичен ред. Стандартните етапи са обект на подробно разяснени в литературата, а в контекста на поставената цел са разгледани и допълнени онази част от тях, които имат пряко отношение към постигането ѝ.

3.1. ПЛАНИРАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

При избор на изследователски подход следва да се преценят някои основни неща (Department of Environmental Protection, 1994):

- Исторически преглед на изследваната територия - историческите фактори са съществени, тъй като всичко свързано с миналото на изследваната територия или в близост би следвало да има ефект върху настоящите условия;
- Обхват и цели на изследването - обхватът и целите определят приложимостта на сондажи или избор на индиректен геофизичен подход;
- Известни или очаквани геоложки условия – известни или загатнати, те са съществени за избора на конкретен геофизичен метод(и), който да бъде използван;
- Общи условия на терена – препоръчително е да се извърши оглед на място – за наличие на метални предмети, огради, електропроводи, пътна настилка, натовареност на трафика, растителност, мочурища и др.;
- Принципи на работа, приложения, силни страни и ограничения на различните геофизични подходи – правилният избор на метод се реализира с тази точка, за която тя е съществена. В контекста на предходните точки, геофизичният метод трябва да бъде избран съобразно неговата приложимост.

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

Първите четири условия са в основата на създаването на програмата за изследването, а последното повишава шансовете за икономически най-ефективната му реализация.

За локализирането на кухни, микрогравиметрията е универсален подход, независимо от тяхното съдържание и условия на средата (виж Таблица 1). Изборът е обоснован с функционалната, екологична и икономическа ефективност на метода.

3.1.1. Данни за района

Информацията, която може да бъде събрана за един район, включва текстови и графични данни. За да бъдат полезни и рационално използвани през различните етапи на изследването, тези данни следва да бъдат преобразувани в подходящ вид при необходимост. Докато за текстовите данни това изискване се изчерпва със съхранението им в подходящ електронен формат, то за графичната информация то може да включва операции по сканиране, геореферирание и векторизиране.

Сканирането е стандартна процедура, която не изисква специализирани умения. При георефериранието обаче е важно да се избере подходящ трансформационен модел за преминаване в желаната координатна система. Векторизирането също е свързано със специфични особености свързани с качеството на изображението и избор между автоматичен или ръчен режим според това.

3.1.2. Проектиране на наблюденията

Проектирането на наблюденията е това, което в последствие може да доведе до успешна интерпретация на резултатите или да превърне изследването в пропиляване на ресурси. Целта определя следните параметри (Murray, 2001):

- Ориентация – определянето на направленията, по които да се извършват наблюденията е важно, защото при успоредна на изследвания обект ориентация е възможно да се пропусне пълният ефект на тялото. Доколкото разположението му може да се прогнозира по предварителните данни, направлението на измерванията под кос спрямо него ъгъл биха довели до значително по-добри данни, отколкото успоредни.

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

- Гъстота – в случаите с малки по-размер обекти, каквито са кухините, гъстотата на станциите е дори по-съществена от ориентацията. За разлика от регионалните измервания, например, при които броят на станциите се определя от бюджета, при локалните задачи наличната информация за геологията и съществуващият модел на аномалиите са определящи за разстоянията между точките. Докато в първия случай те са от порядъка на километри, при детайлната микоргравиметрична снимка достигат до няколко метра.

Разстоянията между точките трябва да бъдат обосновани с предполагаемите размери на изследвания обект. Така, например, гравиметрични измервания през 2 m и подобрени методи за анализ могат да спомогнат за локализирането на кухина с размер до 1 m на определени дълбочини (Хейдакис, 2004).

Гъстотата на наблюденията е необходимо да бъде по-висока там, където гравитационното поле се изменя по-бързо, тъй като резолюцията е от съществено значение за последващата интерпретация. Ако липсват предварителни гравитационни данни, се препоръчва равномерно покритие на района, на база чиито резултати се извършват допълнителни наблюдения.

- Конфигурация – дали измерванията да бъдат организирани в мрежа или полигонов ход зависи от размерите на обекта. За компактните обекти са подходящи площните изследвания с регулярна конфигурация. За линейни обекти - тунели, например, измерванията могат да бъдат организирани в алтернативна мрежова конфигурация или в детайлни полигонови ходове, които да осигурят полезна надлъжна информация, но същевременно са с ограничени възможности за създаване на надеждна двумерна картина на района.

Изборът на базови станции, в която да започват и приключват гравиметричните рейсове, е желателно да бъде на централни, леснодостъпни места със стабилна основа. За дълги линейни обекти се допускат отворени рейсове, които обаче трябва да са съставени от добре определени общи базови станции, например: А-В-А-В-С-В-С и т.н.

- Разположение на станциите – разположението на всяка отделна станция трябва да бъде съобразено, така че да бъдат сведени до минимум физическите влияния, които не подлежат на количествена оценка или не позволяват извършване на измерванията. В това число

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

са включени нестабилната земна основа, силните ветрове, ограниченият достъп (река, частна собственост, културен артефакт и други). Допуска се отклонение в разстоянието между точките, като все пак се съхрани доколкото е възможно планираното покритие.

За получаване на абсолютните гравиметрични стойности на точките от мрежата се планира привързване към точки от опорната гравиметрична мрежа. В зависимост от времетраенето на пътя помежду им, това може да стане с или без междинни точки.

Допуска се също привеждане на наблюденията към произволно ниво, но такава ситуация не е желателна поради невъзможност за обединяване на данните от различни гравиметрични изследвания.

3.1.3. Оборудване

Селекцията на оборудване се заключава в избор на подходящи уреди за провеждане на прецизни микрогравиметрични наблюдения, както и определяне координатите и височините на гравиметричните станции.

- Гравиметри

Измерванията на абсолютната стойност на силата на тежестта са трудни, изискват сложна апаратура и продължителен период на наблюдения. Измерването на относителната стойност на силата на тежестта, т.е. разликите в силата на тежестта между отделните станции, е по-лесно и се явява стандартна операция при гравитационните снимки. Възможният избор на уред за поставената цел е относителен гравиметър от класическите модели на LaCoste&Romberg (LCR) или съвременните варианти на Scintrex (Hunt, 2001). Въпреки че гравиметрите Scintrex са по-лесни за работа при по-неопитен оператор, те страдат от по-голям дрейф и калибрационни проблеми в сравнение с инструментите LCR.

Поради характерното за всички тях изместване на нулевата точка (дрейф), дължащо са на непрекъснати и неизбежни деформации в системата за отчитане на уреда, тази особеност задължително се взема предвид при планиране на измерванията. В техническите данни на уреда обикновено са посочени стойностите на дрейфа с препоръка за периодни изследвания. Такова изследване може да се направи, като уредът бъде поставен на точка със стабилна основа, далеч от смущаващи фактори (като интензивен трафик,

например). В продължение на времето, без да бъде местен и повторно хоризонтиран, се извършват по няколко отчета, впоследствие осреднявани, през половин час (или друг интервал съобразно характеристиките на избрания уред). Наблюденията в милигали се коригират заради земно-приливните вариации. При една идеална система без дрейф не би имало разлика в отчетите, но в реалния случай следва да се прецени времеви интервал, за който скоростта на изместването може да се счете за постоянна съобразно изискванията за точност на решаваната задача. Този период обуславя времетраенето на гравиметричните рейсове, а така определената скорост може да се включи в последващата обработка на измерванията.

- Уреди за позициониране

Някои от съвременните гравиметри са окомплектовани с ГНСС приемник, чиято точност обаче не е достатъчна за целите на микрогравиметрията. Предвид вертикалния градиент на силата на тежестта, грешка от 1 m води до грешка 0.3 mGal в стойността на силата на тежестта (Стойнов, 1974). Това обуславя критично значение на височинните определения. Същевременно хоризонталният градиент е около 100 пъти по-малък от вертикалния и съответните координатни изисквания са толкова по-ниски.

Модерните ГНСС уреди позволяват пространствени определения с необходимата прецизност в реално време или с последваща обработка. Съществено предимство на ГНСС технологиите е тяхната независимост по отношение на налична геодезическа основа, особено в отдалечени райони, както и тяхната компактност.

Доколкото точността и надеждността на ГНСС уредите са в зависимост от условия като спътникова видимост, геометрия, многопътност на сигналите и атмосферни условия, като алтернативен подход със съпоставима точност се препоръчват измервания с тотална станция, теодолит и/или нивелир за получаване съответно на плановите координати и котите на станциите. За височинните определения е препоръчителна геометрична нивелация или евентуално тригонометрична с визури до 300 m, при които поправката заради кривината на Земята и вертикалната рефракция е незначителна.

3.2. РАБОТА НА ТЕРЕН

Същинският етап с гравиметричните наблюдения се предшества от трасиране на проектираната мрежа. Ако точността на избраните за трасиране средства не отговаря на изискванията или се наложи изместване на станции спрямо проектното им местоположение, то следва да се извърши последващо заснемане - преди, по време или след гравиметричните измервания.

Работата с гравиметъра е сравнително проста, но за извършването на качествени наблюдения, трябва да се вземат предвид установените практики за работа с гравиметрите изобщо, както и специфичните препоръки на производителя за конкретния уред. Провеждането на гравиметричните рейсове е съобразено преди всичко с дрейфа на гравиметъра и конфигурацията на мрежата. Възможно е наблюденията да бъдат повлияни от въшните условия на средата, като в случаите на повишена сеизмична активност, например, това може да доведе до невъзможност за стабилизиране на махалото и необходимост от преустановяване на работата за момента. Друг потенциален проблем при провеждането на гравитационно измерване са нестабилните земни материали и близостта до източник на вибрации (като натоварен с камиони трафик). Тези условия могат да бъдат преодоляни основно с търпение, леки промени в разположението на станциите или промяна във времето на измерванията.

Самият гравиметър се управлява от един оператор. На всяка станция гравиметърът се поставя върху метална тринога („пиростия“), която осигурява стабилна основа. Инструментът се подравнява чрез повдигателните винтове, след което се освобождава махалото и се извършват отчети. В зависимост от избора на уред записите на информация са различни – при тези с електронно отчитане се задават параметрите на изследването и в реално време се нанасят някои основни корекции върху наблюденията, които впоследствие се съхраняват в паметта на уреда. При по-старото поколение гравиметри с механично отчитане е важно карнетите да бъдат попълнени със следните данни:

- Номер на инструмента;
- Оператор;
- Идентификационен номер на станцията;
- Дата и час на отчета – времето е важно за определяне на приливните корекции и дрейфа на инструмента;

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

- Отчети – определен брой или до получаването на два последователни еднакви;
- Височина на инструмента;
- Температура на уреда – поддържането на една и съща температура в херметичната системата за отчитане на уреда е съществено за точността на измерванията; промяна спрямо установената работна стойност предизвиква разтягане или свиване на измерителната системи, а от тук и върху дрейфа на инструмента;
- Напрежение на акумулатора – при понижаване на напрежението под определена стойност се повишава скоростта на дрейфа.

С приключването на измерванията, махалото се затяга и се преминава към следваща станция.

3.3. ОБРАБОТКА НА ГРАВИМЕТРИЧНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

Преди резултатите от гравиметричните измервания да бъдат интерпретирани, от тях е необходимо да се отделят всички вариации на гравитационното поле на Земята, които не са резултат от плътностни нееднородности в изучаваната област. Този аспект на гравитационните измервания ги различава от други геофизични изследвания като магнитните и георадарните, например, чиито данни могат да се използват директно.

3.3.1. Предварителна обработка

Посочените по-долу стъпки предхождат изчисляването на силата на тежестта в станциите. Ако се използва гравиметър от ново поколение, те могат да са автоматизирани и крайният резултат от тях да бъде получен в реално време на терена, но в противен случай те трябва да бъдат приложени допълнително върху измерванията.

- Константи на гравиметъра

Всеки един гравиметър има една или няколко уникални константи, чието прилагане е указано в техническите данни от производителя. Посредством тях отчетената в станция стойност O_i се конвертира в O'_i в съответната единица на силата на тежестта.

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

- Корекция заради височината на инструмента

Изчислява се по формулата:

$$HC_i = 0.3086 \frac{(h_i^o - h_i^m)}{100} \quad (1),$$

където h_i^o е височината на уреда спрямо основата, а h_i^m е спрямо точката.

- Корекция заради земно-приливните вариации

Във всяка фиксирана точка на Земята силата на тежестта се променя в течение на времето вследствие гравитационните влияния на Слънцето и Луната. Периодичните изменения на силата на тежестта, предизвикани от съвместното им въздействие, се наричат приливни вариации. Те предизвикват промяна във височината на наблюдаваните точки до няколко десетки милиметра и променят разстоянието до масовия център на Земята. Имат максимална амплитуда от порядъка на 0.3 mGal и минимален период около 12 часа (Кири, 1988), поради което следва да бъдат отчетени.

Ако се използва гравиметър с относително голям дрейф на нулата, то измерванията на базовите точки се извършват през интервали, значително по-малки от приливния цикъл, и приливните вариации автоматично се отстраняват с внасянето на поправките заради дрейфа на инструмента. Ако се използва прибор с малък дрейф, измерванията на базова станция обикновено се провеждат само в началото и в края на деня. Междувременно приливните вариации претърпяват пълен цикъл на изменение, поради което е необходимо приливната поправка да се въведе отделно. Приливните ефекти са предсказуеми и сведения за тях се публикуват ежегодно в геофизичните издания³, откъдето могат да бъдат определени съответните приливни корекции TC_i .

- Инструментален дрейф

Установената практика с повторни измервания в една и съща базова станция през определен период позволява изчисляването на корекции заради изместването на нулата на гравиметъра. При предположението, че за

³ В настоящото изследване приливните корекции са определени посредством електронна таблица, предоставена от гл. ас. Георги Митрев, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ)

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

това време помежду им дрейфът има линейно скорост, то тя може да бъде изчислена по формулата:

$$w = \frac{dg_{n,n-1} - dg_{2,1}}{t_n - t_1} \quad (2),$$

където n е броят точки в съответния рейс, а разликите в силата на тежестта между две последователни станции $dg_{i+1,i}$ се определя по формулата:

$$dg_{i+1,i} = O''_{i+1} - O''_i = (O'_i + HC_{i+1} + TC_{i+1}) - (O'_i + HC_i + TC_i) \quad (3)$$

Така стойността на поправката се изчислява по формулата:

$$DC_{i+1,i} = w(t_{i+1} - t_1) \quad (4),$$

а коригираната разлика в силата на тежестта между точките е:

$$dg'_{i+1,i} = dg_{i+1,i} - DC_{i+1,i} \quad (5)$$

В стандартната обработка на гравиметричните измервания, нанасянето на корекции заради изместването на нулата е част от етапа на предварителната обработка. С цел подобряване качествата на микрогравиметричното изследване този параметър е обект на изследване. Неговото определяне и включване в изчислителния процес преминава в последващия етап на изравнение.

- Други корекции

Посочените по-горе корекции са стандартни за болшинството микрогравиметрични изследвания. Специфичните условия на средата могат да наложат допълнителни изчисления като, например, корекции заради сградите в урбанизираните територии. Доколкото не всички пречещи фактори могат да бъдат изключени с подходящия избор на станции и работна технология, то съобразно изискванията за точност на микрогравиметричните изследвания тяхното влияние следва да бъде редуцирано посредством въвеждане на съответните поправки (Радичев, 2013).

Някои фактори, променящи се във времето за периоди от минути до години, също могат да повлияят върху резултатите (Hunt, 2001):

- Изменения в масите на геотермални или петролни резервоари в следствие на тяхната експлоатация;

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

- Промени в атмосферното влияние – промените в атмосферното налягане по време и между измерванията като цяло не надхвърля 10 hPa (10 mbar) и обикновено дори е под 10 hPa, така че локалният му ефект рядко надвишава амплитуда от 2 μGal (стойност посочена и от Merriam (1992));
- Вариации в плитките подземни води;
- Вариации в почвената влага вследствие на дъждове или продължителни периоди на засушаване;
- Активен вулканизъм – документирани са гравитационни промени на стойност до 400 mGal породени от движение на магма на плитки дълбочини;
- Минни работи - добивът в подземни мини причинява гравитационни изменения на повърхността;
- Топографски изменения – промените свързани със строителство на пътища, канали, водни нива и др. могат да имат локален, но значителен ефект;
- Слягания на земната основа.

Посочените фактори следва да бъдат взети под внимание в зависимост от поставените конкретни изисквания за точността на работа. Движенията на хора и превозни средства не предизвикват гравитационни изменения, подлежащи на отчитане, поради своята прекалено малка маса. Те обаче могат да породят вибрации, които да повлияят измерванията.

3.3.2. Изчисляване на силата на тежестта

В стандартния подход, прилаган в геофизичната практика, обработката по 3.3.1. е достатъчна за получаване на стойностите на силата на тежестта в станциите по формулата:

$$g_{i+1} = g_i + dg'_{i+1,i} \quad (33)$$

Типичен елемент за геодезическата обработка на резултатите от измерванията обаче е изравнението по метода на най-малките квадрати (МНМК), което въвежда аналитични условия с цел замяна на случайността със сигурността в решението, както и осигуряване на хомогенност в точността и надеждността на величините (Костадинов, 2012).

Основните начини за обработка по МНМК са параметричното (посредствено) и условно изравнение. Крайните резултати не зависят от

избрания метод, но обемът на изчислителна работа е различен. Съществено предимство на параметричното изравнение пред условното е принципът му, позволяващ неговата автоматизация, поради което тук ще бъде разгледано само то в контекста на гравиметричните мрежи.

3.3.2.1. Параметрично изравнение на гравиметрична мрежа

Същността му се състои във въвеждането на независими параметри, чиито брой е равен на минимално необходимия брой величини m за еднозначно решение на задачата, и изравнените стойности на n на брой измерените величини се представят като функции от избраните параметри (Костадинов, 2012) като $n > m$. Разликата $r = n - m$ определя броя на свръхизмерванията.

Уравненията на измерванията имат вида:

$$\Delta g_{ij} = g_j - g_i \quad (34),$$

където с g_i и g_j са означение съответно стойностите на силата на тежестта в точки i и j , а Δg_{ij} - разликата между тях.

За параметрично изравнение на гравиметрична мрежа е целесъобразно за неизвестни да бъдат приети именно стойностите на силата на тежестта в точките, представени като сума от приблизително определената им стойност g_i^0 и съответната корекция към нея δg_i :

$$g_i = g_i^0 + \delta g_i \quad (6)$$

След заместване на формула $g_i = g_i^0 + \delta g_i$ (6) в $\Delta g_{ij} = g_j - g_i$ (34), уравнението добива вида:

$$\Delta g_{ij} = \Delta g_{ij}^0 + \delta g_{ij} = (g_j^0 - g_i^0) + (\delta g_j - \delta g_i) \quad (7),$$

откъдето уравненията на поправките се изразяват чрез:

$$v_{ij} = -a_{ij}\delta g_i + a_{ij}\delta g_j + f_{ij} \quad (8),$$

където v_{ij} са неизвестните поправки към измерените разлики в силата на тежестта между точките $\Delta g_{ij}'$, a_{ij} - коефициентите пред неизвестните, а стойността на свободния член f_{ij} се изчислява по формулата:

$$f_{ij} = \Delta g_{ij}^0 - \Delta g_{ij}' \quad (9)$$

В матричен вид уравнението на поправките може да се представи във вида:

$$V = AX - L \quad (10),$$

където в $V_{[n,1]}$ е матрица-стълб (вектор) на поправките, $A_{[n,m]}$ е конфигурационната матрица на мрежата, $X_{[m,1]}$ е матрица-стълб на неизвестните, а $L_{[n,1]}$ е матрица-стълб, съдържащ информация за измерванията; в квадратните скоби е означена размерността на всяка от матриците).

Неизвестните $X = [\delta g]$ се определят при спазване на условието $V^T P V = \min$:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (11),$$

където P е диагоналната матрица на тежестните коефициенти. В практиката най-често са прилагани тежестни модели, зависещи от точността на използвания инструмент, като в случаите с един гравиметър са считани за равноточни ($p = 1$). Прилагани са още варианти с тежести, които са обратнопропорционални на разстоянията, времето за измерване и други (Peneva, 2015).

Средните квадратни грешки на неизвестните се определят по формулата:

$$m_{x_i} = \mu \sqrt{(A^T P A)^{-1}} = \mu \sqrt{N^{-1}} = \mu \sqrt{Q_{ii}} \quad (12),$$

където N е нормалната матрица, Q е корелационната матрица, а с i са означени съответните неизвестни; μ е средната квадратна грешка на измерване с тежест единица и се изчислява по формулата:

$$\mu = \sqrt{\frac{[V^T P V]}{n - m}} \quad (13)$$

Точността на данните след изравнението е в зависимост от точността на изходните данни, измерените величини и конфигурацията (геометрията) на мрежата (Костадинов, 2012).

3.3.2.2. Параметрично изравнение на гравиметрична мрежа с въвеждане скоростта на дрейфа като допълнително неизвестно

Съвместната обработка по МНМК води до неизместени и ефективни оценки единствено в случай че грешките в измерванията са само със случаен характер (Костадинов, 2012). Измерванията с груби грешки трябва да бъдат изключени задължително, а тези, които съдържат систематични, трябва да

бъдат коригирани или това обстоятелство да бъде включено в модела на изравнението чрез въвеждане на подходящи параметри.

Изместването на нулата на гравиметъра поражда грешки именно от систематичен характер. В някои съвременни уреди това е стойност, коригирана при измерванията в реално време. Независимо от това обаче, ръководствата на различните уреди препоръчват периодични изследвания на скоростта на дрейфа. Това позволява тя да бъде включена посредством коригиране на измерванията и прилагане на параметрично изравнение в представения по-горе вид.

В случай обаче че скоростта на дрейфа не е известна, изравнителният модел следва да бъде разширен с въвеждането на съответно допълнително неизвестно. Това въвеждане е при предпоставката, че изместването на нулата е с линеен във времето характер (Иванова, 2005). Така уравненията на измерванията добиват разширения вид:

$$\Delta g_{ij} = g_j - g_i + (t_j - t_i)U \quad (14),$$

където U е скоростта на дрейфа, а с t е означено времето на отчитане на точка. Ако измерванията в мрежата са реализирани в k на брой различни епохи, за които според изследванията на дрейфа са настъпили изменения в неговата скорост, то той може да бъде изразен чрез повече от едно неизвестно $U = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$.

Уравненията на поправките са във вида:

$$v_{ij} = -a_{ij}\delta g_i + a_{ij}\delta g_j + (t_j - t_i)U + f_{ij} \quad (15)$$

а матрицата на неизвестните се разширява с допълнителните параметри за изместването на нулата:

$$X_{[m+k,1]} = \begin{bmatrix} \delta g \\ U \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.3.3. Изчисляване на аномалиите на силата на тежестта

Върху получените при изравнението стойности на силата на тежестта се налагат още няколко допълнителни корекции, свързани с ширината на станциите върху елипсоида, както и топографските особености. Финалната стъпка от обработката е изчисляване на аномалиите на силата на тежестта.

- Корекция заради ширината

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

Силата на тежестта се изменя с ширината вследствие на несферичността на Земята и поради това, че ъгловата скорост на точка на земната повърхност намалява от максимална при екватора до нулева на полюсите. Центростремителното ускорение, породено от въртенето на Земята, има отрицателна радиална компонента, която води до това изменение. Формата ѝ може да се разглежда като сплеснат в полюсите хомогенен сфероид или елипсоид, при когото разликите между екваториалните и полярни радиуси е около 21 km (Кири 1988). Следователно точки в близост до екватора са разположени по-далеч от масовия център на Земята, отколкото тези в близост до полюсите, поради което силата на тежестта се увеличава от екватора към полюсите. Размерът на този ефект намалява заради разпределението на масите, обуславяно от екваториалната раздутост, което е причина в екваториалните райони да е съсредоточена по-голяма маса, отколкото в полярните.

Сумарният ефект от тези фактори влияе по такъв начин, че силата на тежестта в полюсите е по-голяма отколкото на екватора с 5 186 mGal, като градиента по посока от север на юг за ширина φ е $0,812 \sin 2\varphi$ mGal/km (Кири, 1988). Максимални поправки се налагат при ширина 45° , където раликата е около 0.01 mGal за 1 200 m изместване на север/юг (Murray, 2001).

Формулата на Сомияна описва връзката между силата на тежестта и ширината:

$$\gamma_o = g_\varphi = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (17),$$

където g_φ е силата на тежестта на ширина φ , а $a = 6378137$ m, $b = 6356752.31425$ m, $\gamma_e = 978032.53359$ mGal и $\gamma_p = 983218.49378$ mGal са параметри за елипсоида WGS-84.

- Топографски редукции

Въпреки че гравиметричните изследвания се възприемат като геофизичен метод, физичният смисъл на гравитационните аномалии обикновено се разглежда от гледна точка на гравитационното смущение по дефиниция на физическата геодезия (Meuers, 2002). Връзката с теорията на потенциала определя аномалните обекти не просто като плътностна нехомогенност спрямо референтно ниво, но и резултат от измервания

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

отнесени към различната наблюдателна повърхнина. Като обект на изследвания проблемът, свързан с избора на височинна система, е решен в полза на наделипсоидните височини.

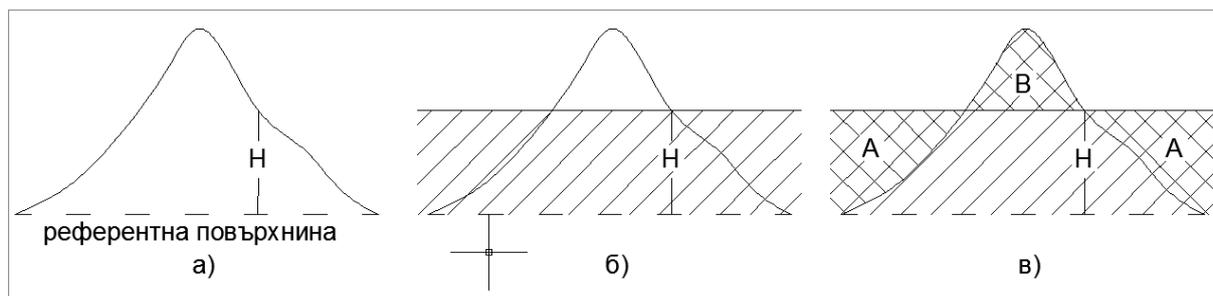
Поправките заради различните височини на точките на земната повърхност, в които се извършват гравиметрични наблюдения, се състоят от три части (Кири, 1988):

○ Редукция „свободен въздух“

Редукцията „свободен въздух“ δg_{CB} коригира намаляването на силата на тежестта с увеличаване на височината поради отдалечаване от центъра на Земята в съответствие със Закона на Нютон. За елиминиране на този ефект върху наблюденията, данните от всяка една гравитационни станции в едно гравиметрично изследване трябва да бъдат коригирани спрямо общата референтна повърхнина с формулата:

$$\delta g_{CB} = -0,3086H \text{ mGal} \quad (18)$$

където H е височината на точка в метри (Фигура 1. а)). Стойността на поправка δg_{CB} е отрицателна, когато точката се намира над основната повърхнина, към която се привеждат наблюденията, и е с положителен знак, ако е под нея.



Фигура 1. Топографски редукции: а) Редукция "свободен въздух"; б) Редукция "Буге"; в) Поправка заради релефа.

○ Редукция „Буге“

Поправката заради свободния въздух отчита само изменението в разстоянието на наблюдаваните точки от центъра на Земята и при нея не се взема предвид гравитационният ефект на скалата, намираща се между наблюдаваните точки и повърхността, към която се привеждат. Редукцията

„Буге“ δg_B отстранява този ефект чрез апроксимация на скалния слой под наблюдаваните точки с безкраен хоризонтален слой с постоянна плътност, чиято дебелина е равна на височината на наблюдаваните точки на повърхността, към която се привеждат (Фигура 1. б)). Формулата, по която се определя стойността ѝ, е:

$$\delta g_B = 2\pi G\rho H = 0,04191\rho H \text{ mGal (19)},$$

където $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1}\text{m}^3\text{s}^{-2}$, а ρ е плътността на скалата в kg/m^3 .

Чрез редукцията „Буге“ се отчита гравитационното привличане на скалата между наблюдаваните точки и повърхността, към която се привеждат. Редукциите „свободен въздух“ и „Буге“ често се прилагат заедно, обединени като поправка заради височината на наблюдаваните точки.

○ Поправка заради релефа

Редукцията „Буге“ се прилага при предположението, че релефът около наблюдаваната точка е равен. Това обаче рядко е така и по тази причина особено в случаите на хълмист и планински релеф изчисленията трябва да се коригират с още една поправка. С въвеждането на т. нар поправка заради релефа δg_p се преминава от привличане на цилиндричното плато, въведено с поправката „Буге“, към възстановяване на първоначалния топографски слой. Поправките се изчисляват с плътността, използвана за редукцията „Буге“.

Поправките заради релефа са винаги положителни, тъй като всяко отклонение на физическата земна повърхност от равнината намалява силата на тежестта поради недостиг на привличаща маса в пониженията и привличане нагоре заради положителните форми. Това може лесно да се разбере с помощта на Фигура 1 в) - областта, означена с А, образува частта на слоя за редукцията „Буге“, макар и да не е запълнена със скала. Следователно тя се явява излишък и нейното влияние трябва да се компенсира с помощта на положителна поправка заради релефа. Областта В се състои от скала, която не е включена в редукцията „Буге“. За точките на наблюдение в тази област тя намалява силата на тежестта, поради това привличането отново следва да бъде коригирано с положителна поправка.

Поправката заради релефа е единствената операция в редукцията на гравитационните данни, която не може да бъде напълно автоматизирана. Класическият вариант за въвеждането на тази поправка е посредством

кръгова палетка, разделена от радиални и концентрични линии на множество сектори (Кири, 1988). Поставена върху топографска карта, центърът на палетката се съвпада с гравиметричната станция, а за всеки сектор се определя средна височина на релефа. Според отдалечеността от центъра на палетката по таблици, създадени посредством разчет на гравитационния ефект в секторите на вертикалния цилиндър за точките по неговата ос, се определят стойности, чиято сума представлява поправката заради релефа. Препоръчва се за зона с радиуси до 200 м да се използва карта в мащаб 1:10 000, от 200 м до 1 000 м - в мащаб 1:25 000, от 1 000 м до 12 000 м – в мащаб 1:50 000, а при по-голям радиус – в мащаб 1:100 000 или по-дребен (Макаров, 1968).

Определянето на поправката по гореописания метод обаче изисква доста време. Трудоемкостта на операцията може значително да се намали, ако се извърши оцифряване на релефа, след което бъде създадена мрежа от правоъгълни клетки (грид) с размери, съобразно близостта до гравиметричната станция (Кири, 1988). Изчисляването на поправките за така организирания данни вече може да бъде лесно автоматизирано.

Влиянието на релефа в равнинни райони рядко превишава 1 mGal. В пресечени местности обаче неговото влияние е значително по-голямо, достигайки максимални стойности в долини със стръмни склонове, планинските върхове и др. Там където влиянието на релефа е значително по-малко от необходимата за снимката точност, поправката заради релефа може да се пренебрегне. За целите на микрогравиметрията обаче прилагането на тази поправка е съществено.

Според топографските редуции, които се нанасят върху силата на тежестта, се различава няколко основни аномалии. Те имат различна приложимост за интерпретация на гравиметричните данни. По-долу са разгледани аномалията „свободен въздух“ като стъпка към получаването на аномалията „Буге“, използвана за установяване на локални геоложки обекти.

3.3.3.1. Аномалия „свободен въздух“

За точка на земната повърхност, аномалията „свободен въздух“ се определя по формулата

$$\Delta g = g - (\gamma_0 - \delta g_{CB}) \quad (20),$$

където g е наблюдаваната стойност на силата на тежестта, а γ_0 е нормалната сила на тежестта на съответната точка върху елипсоида,

определена по формула $\gamma_0 = g_\varphi = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (17),$

Аномалията „свободен въздух“, изчислена с нормални височини, се нарича смесена. По-рядко използвана в практиката е чистата аномалия, изчислена с наделипсоидните коти на точките.

Аномалията „свободен въздух“ е причинена от привличането на всички аномални маси на Земята. Именно затова в геодезията тя се използва за определяне на земното гравитационно поле. В този смисъл тя не се използва директно в интерпретацията за откриване на локални аномални обекти, но е стъпка към по-нататъшните изчисления.

3.3.3.2. Аномалия „Буге“

При интерпретацията на гравиметричните наблюдения притеглянето на локалните геоложки обекти до голяма степен е приглушено от влиянието на дълбочинни аномални и топографски маси. Това налага определянето на посочените по-горе редукция „Буге“ и поправка заради релефа, участващи във формулата за изчисление на аномалията „Буге“:

$$g_B = \Delta g - (\delta g_B - \delta g_P) \quad (21)$$

Аномалията „Буге“ се явява основа за интерпретацията на гравиметричните данни на сушата. При морски снимки аномалията „Буге“ се изчислява обикновено за крайбрежните и маловодните области, тъй като отделя гравитационните ефекти, свързани с локалните изменения в дълбочина на водния слой. Аномалията „Буге“ обаче не е подходяща за дълбоководни снимки, тъй като прилагането на редукцията „Буге“ в такива случаи се явява изкуствено допускане, водещо до значително повишаване на положителната стойност на аномалията „Буге“ без съществено увеличение на стойностите на локалното гравитационно поле на геоложката природа. Вместо това за интерпретация в такива райони често се използват карти на аномалията „свободен въздух“ (Кири, 1988).

3.4. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Анализът и интерпретацията на резултатите от гравиметричните наблюдения се осъществява удобно във вид на карти с изолинии или профили. На този финален етап при необходимост може да бъде се отстранят някои остатъчни влияния посредством филтрация на данните и окончателния вид на аномалията „Буге“ да послужи за локализиране на дълбочинно разположените кухни.

3.4.1. Представяне на резултатите

Резултатите от гравиметричното изследване могат да бъдат подходящо представени във вид на карта с изолинии или по профили. Визуализираните данни могат да бъдат различни според целите на задачата – от карта със сурови данни, която представя гравитационните отчети с нанесени корекциите от точка 3.3.1.; гравитационна карта „свободен въздух“, представяща суровите данни, коригирани заради височините на станциите; до различни варианти на карти с аномалиите „Буге“ (Кири, 1988).

От гледна точка на поставената цел за локализиране на кухни се разглеждат именно картите от последния вид. Съобразно предложената по-горе обработка интерес би представлявали пълната „Буге“ карта, тъй като тя представя влиянието върху резултантната гравитационна стойност на всички земни материали под земната повърхност с включени всички необходими корекции.

При визуализация на резултатите като повърхнина, структурата от данни може да бъде мрежа с регулярен или нерегулярен характер. Дори и предварително проектирана като регулярна, практическата реализация на мрежата може да бъде силно видоизменена поради условията на терена. Счита се, че регулярният ѝ характер е запазен при отклонение на станцията не повече от 10% (Murray, 2001).

Със съвременните софтуерни средства привеждането на нерегулярната мрежа в грид не е проблем, но е важно да бъдат съобразени следните параметри:

- Метод – избор на подходящ метод за изчисляване на стойностите във възловите точки на грида. Подходящ е популярният метод „Кригинг“;
- Обхват – в рамките на грида трябва да бъде обхванат целият изследван район;

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

- Резолюция – изборът на стъпка (разстояние между възлите на мрежата) определя гладкостта на повърхнината. Подходящ избор е стойност по-малка от разстоянията между точките и същевременно не твърде малка, за да не се затормозява изчислителния процес, поради многократно по-големия брой данни;
- Точност – стойностите във възлите на мрежата да бъдат определени с необходимата точност.

С правилно подобрите параметри действието няма да се отрази на качествения анализ на резултатите, а същевременно ще улесни и допълнителните изчисления по филтрацията на „суровите“ аномалии „Буге“.

3.4.2. Филтрация на данните

Получените стойности за аномалията „Буге“ в практиката могат да бъдат използвани директно за анализ и интерпретация. Освен полезна информация обаче те носят в себе си и грешки от различен характер, породени от апаратурата, оператора, условия на средата, модела на данните и др. Те могат съществено да нарушат вида на фактическите закономерности.

В основата на предложените алгоритми за филтрация е метод, основан на визуалните качества на изследваното поле, характеризиращо се с някаква степен на загладеност (Любимов, 1988).

- Филтър “Ханинг”

Филтърът се използва за заглаждане на пространствени данни от типа на картите с аномалия „Буге“, представляващи регулярна мрежа от данни. Чрез него се премахват високочестотни смущения в обработените данни или измерванията.

Формата на филтъра по едно направление (еднодименсионален филтър) се дава с формулата:

$$h_i = \frac{1}{2T} \left(1 + \cos \frac{i\pi}{T} \right) \quad (22),$$

където h е стойността на филтрираната точка i , а T е ширината на филтриращия прозорец в брой точки. Графиката на филтър от пет точки е представена на Фигура 2.

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

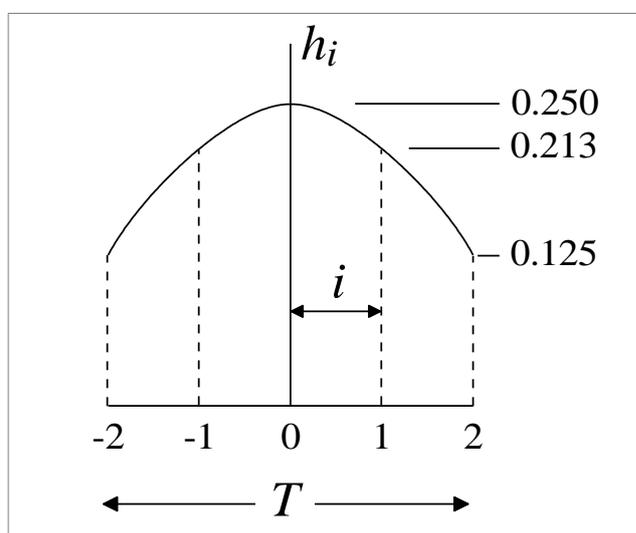
Филтърът се използва на конволютен принцип: умножават се стойностите на оригиналното поле – в случая това на аномалиите „Буге“, и се получават на филтрираната стойност като сума от това умножение. Необходимо е също получените коефициенти да бъдат нормализирани при условието, че тяхната сума е равна на единица.

Връзката за двумерен филтър се дава с формулата:

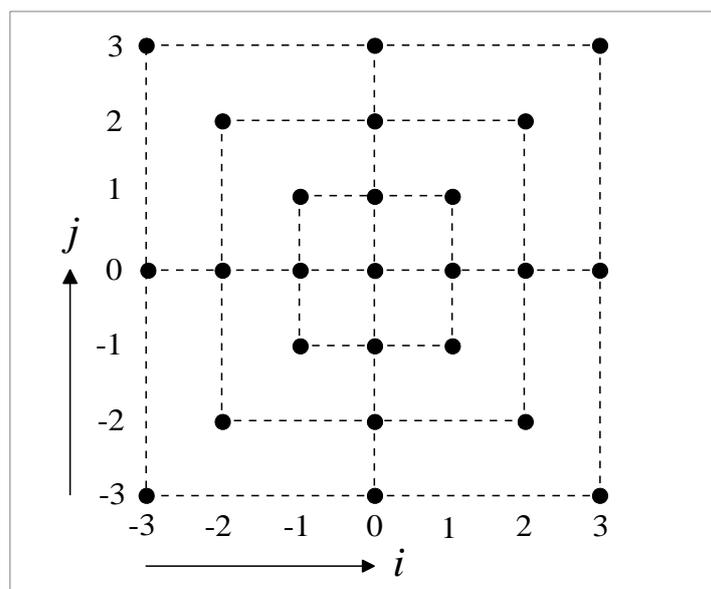
$$h(i, j) = \frac{1}{2T} \left(1 + \cos \frac{\pi}{T} \sqrt{i^2 + j^2} \right) \quad (23),$$

където $h(i, j)$ е филтрираната стойност във възел $h(i, j)$ от мрежата, а T е ширината на квадратен филтриращ прозорец.

Параметрите (i) и (j) получават стойности според схемата на Фигура 3, илюстрираща филтър с размер 7×7 точки.



Фигура 2. Едномерен филтър на Хантинг за 5 точки



Фигура 3. Двудименсионален филтър на Ханинг за 7 x 7 точки

- Полиномен филтър.

При изключване и изглаждане на геофизични наблюдения, преобразувания на мрежи, съставяне на карти, изчисляване на производни от по-висок ред и други трансформации на геофизичните полета при равномерна (или квазиравномерна) мрежа и висока точност на наблюденията от съществено значение е ефективното представяне на наблюдаваната функция $f(x)$ по дължината на линия (профил) със стъпка Δx , степенен полином в подвижен прозорец, включващ k наблюдения:

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0 \quad (24)$$

при условието:

$$F = \sum [f(x) - a_n x^n - a_{n-1} x^{n-1} - \dots - a_0]^2 = \min \quad (25),$$

като в резултат на решението на системата нормални уравнения:

$$\frac{\partial F}{\partial a_j} = 0, \quad (j = a_n, a_{n-1}, \dots, a_0) \quad (26)$$

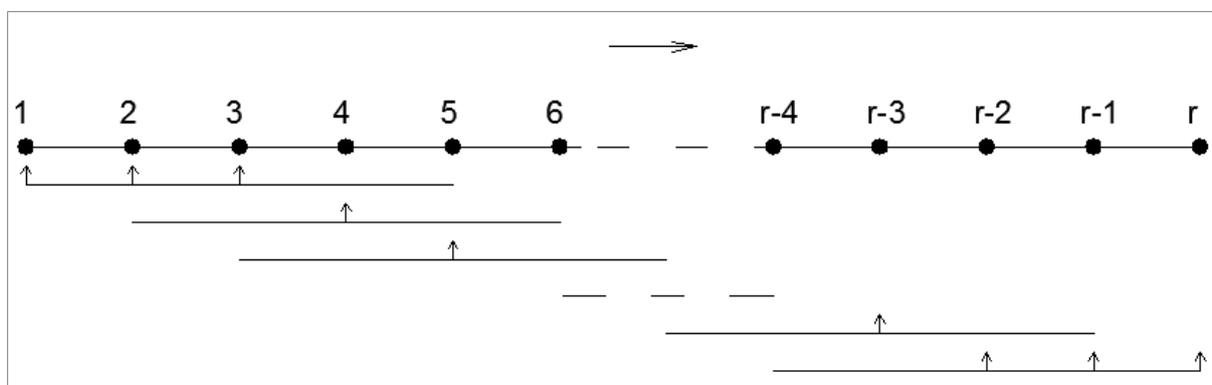
се определят неизвестните коефициенти a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 .

За прилагането на филтрацията, основана на полиномната апроксимация, се предвижда задаването на следните няколко параметъра:

- Степен на полинома – спрямо предложения филтър „Ханинг“, основан на функционална зависимост с единствен минимум, полином от втора, трета и по-висока степен, предполага един, два и повече локални минимума на полето;

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

- Размер на филтриращия прозорец – подходящ за филтрацията е прозорец с нечетен брой възли m , чиито брой е по-голям от степента на полинома и по-малък от размера на реда/колоната (r/c) на мрежата, по която се прилага. В рамките на филтриращия прозорец се изчислява нова стойност на централния възел на база апроксимиращата всички, попадащи в прозореца, възли функция. Изключение се допуска за крайните точки на редовете/колоните, чиито нови стойности се определят като периферни за функцията на съответния прозорец (Фигура 4). Поредният номер на централната точка се приема стойности в интервала $\left[\frac{m}{2}; r - \frac{m}{2} + 1 \right]$, прилагана по редове, или $\left[\frac{m}{2}; c - \frac{m}{2} + 1 \right]$ по колони, като $\frac{m}{2}$ се закръгля към по-голямото число. Филтърът може лесно да се приложи и във вариант на нерегулярни разстояния между точките, като вместо регулярната стъпка се укажат техните стойности.



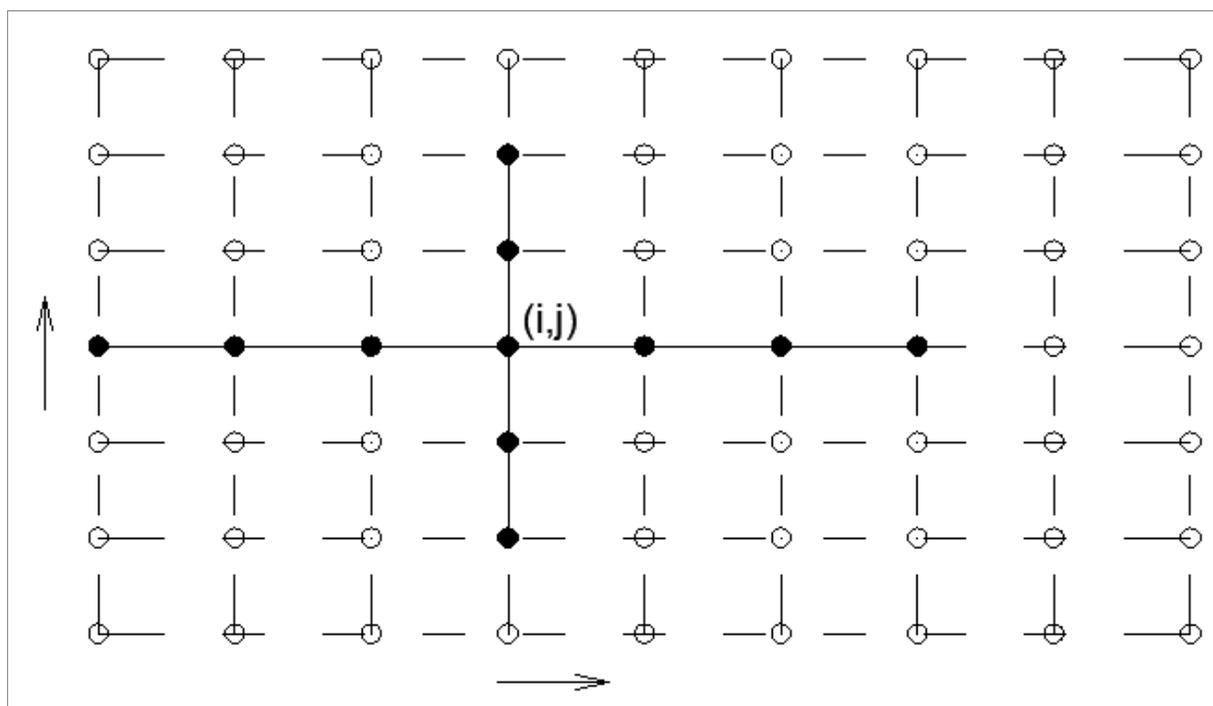
Фигура 4. Еднодименсионална филтрация с размер (брой възли) на прозореца $m=5$ по профил с дължина r

Предложението за двумерен вариант на филтъра включва изчисляване на новите стойности във всяка точка веднъж по надлъжните профили на мрежата и втори път по напречните. Получените две стойности се осредняват (Фигура 5). В този смисъл, това предложение се различава от посоченият горе двумерен вариант на „Ханинг“ и обичайно прилаганите в практиката дизайни на двумерен филтри. Същевременно този вариант предлага

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

гъвкавост по различните направления, което позволява да бъде съобразен с размерите на обекта, както и да бъде директно приложен в частните случаи на измервания по профили, каквито са често срещани в практиката.

- Брой филтрации – възможност за неколккратно прилагане на горните параметри, като при всяка поредна филтрация се използват резултатите от предходната.



Фигура 5. Двумерен полиномен филтър с размери на прозореца $m=7$ по редове и $k=5$ по колони в точка (i,j)

3.4.3. Анализ на качеството на данните

Процедурите по обработка на данните за получаване на всяка една от гравитационните карти включва допускането, че те могат да бъдат верни или не и могат да повлияят интерпретацията на гравитационните данни. Затова подготовката и качественият анализ на всяка карта може да са използват за идентифицирането на отклонения или аномалии, породени от обработката на данните. По този начин биха могли да бъдат изследвани качествата на предложените по-горе методи за филтрация.

Всяко внезапно нарушение на картината, която аномалиите „Буге“ представя, може да подсказва наличието на грешка и заслужава проверка.

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

Грешките могат да се дължат на проблем в отделна станция, инструменталния дрейф в рамките на даден рейс, грешна кота и т.н.

Разграничаването на грешките от аномалиите, породени от реални обекти, е сложен процес, но все пак има някои характерни белези, които да послужат като насока. При гравиметрични изследвания с големи разстояния между станциите е напълно възможно наличието на няколко точки със значително по-високи/ниски стойности на аномалията спрямо останалите. При детайлните микрогравиметричните снимки обаче не е нормално да има отделни станции с рязко различаващи се стойности. Големината на аномалните тела и реалистичните плътностни вариации поставят ограничение върху размера на вариациите между станциите.

Признаците, които подсказват проблем с данните, могат да бъдат класифицирани в следните групи (Murray, 2001):

- Анализ на тенденцията – аномалии, които не следват околната тенденция, са подозрителни.
- Теренна корелация – аномалиите над някои терени имат отличителен характер и всичко, което не се съчетава с него, следва да бъде проверено. В някои райони характерът е високочестотен и разположението на станциите може да не представя характерът му.
- Геоложките очаквания – геологията в района подсказва направлението на аномалиите и потенциалните възможности за дълги линейни обекти или малки високочестотни обекти.

Един надежден набор от данни би трябвало да притежава следните характеристики:

- Данните трябва да се променят плавно;
- Значителните аномалии трябва да се наблюдават в повече от една станции;
- Аномалиите не трябва да следват гравиметричните рейсове;
- Тенденциите трябва да преминават плавно между отделните рейсове;
- Характерът на аномалиите не трябва да е в конфликт с геоложката информация.

3.4.4. Локализиране на кухини

Анализът на качеството на данните и отстраняването на грешките следва да доведе до една изчистена картина на аномалиите „Буге“.

Интерпретацията на гравиметричните данни се осъществява с помощта на преки и косвени методи. Преките методи за интерпретация се основават на непосредствено получената от гравитационната аномалия информация за аномалното тяло. Те включват оценка на дълбочината, излишната маса (разликата в масата на аномалното тяло и околната скала) и оценка на размера.

При косвената интерпретация тяло, предизвикващо гравитационна аномалия, се апроксимира от модел, чиято теоретична аномалия се изчислява, и параметрите на моделното тяло се изменят, докато изчислената аномалия не съвпадне максимално добре с наблюдаваната. Доколкото това е свързано с нееднозначността в решението на обратната задача, полученият модел не се явява единствено възможен вариант за интерпретация.

Разположението на обекти посредством карти с аномалиите „Буге“ може да се определи и чрез визуален анализ данните. Значително по-малка плътност на кухините спрямо обкръжаващата ги среда е предпоставка за значителни отрицателни аномалии.

Желателно е интерпретацията да се допълни с ограничаващи условия, идващи от повърхностната геология, геоморфология, различни геофизични данни и др. В условията на карстови системи с развити пещери, би могло да се извърши калибриране на гравиметричните измервания на повърхността над пещера с наличен тримерен модел. Получените стойности над известния обект в съпоставка с конкретните параметри на тялото осигуряват ценна информация за пространствената ефективност на метода и биха могли да се интегрират в интерпретацията над неизвестни територии.

Представянето на резултатите от гравиметричните изследвания във вид на карта лесно може да се интегрира в една съвременна ГИС система. От една страна, подобно действие ще подпомогне съпоставката на различните видове данни за конкретния обект. От друга, информацията от изследвания на различни територии ще бъде съчетана в изграждането на една цялостна картина за подземните структури.

3.5. ОБОБЩЕНИЕ

Утвърдената в геофизичната практика технология за планиране, реализация и обработка на микрогравиметрични изследвания е добра работна основа. С въвеждането на изравнение на гравиметричните измервания по МНМК за изчисляване на силата на тежестта в станциите се

3. Описание на възприетия метод (технология) – мотиви и аргументи

въвеждат аналитични условия, с което се заменя случайността в сигурността в решението.

Наличието на неизбежен инструментален дрейф изисква специално внимание, поради систематичния характер на грешките, които поражда. Това обуславя два варианта на обработка по МНМК – първи, с предварително определена стойност на дрейфа и, втори, с изчисляването му като елемент на изравнението.

Крайните резултати от обработката – аномалиите „Буге“, са от интерес за локализирането на аномално тяло. Поради високата чувствителност на метода те често страдат от грешки, които затрудняват интерпретацията. Чрез филтрация с подходящи методи и параметри тяхното влияние би могло да се редуцира. С предложения метод „Ханинг“ стойностите са апроксимирани с крива, която подхожда на природата на аномалията, при филтриращ квадратен прозорец с избран размер. Полиномният филтър, от друга страна, предлага гъвкавост по отношение на апроксимиращата функция, размера на прозореца и броя филтрации. Реализацията на площната обработка е базирана на надлъжните и напречните профили на мрежата, като в частния случай позволява филтрация само по профили.

В условията на карстови системи с развити пещери гравиметричните данни е подходящо да се калибрират с наблюдения над обекти с наличен тримерен модел или данни от други методи. Комплексната интерпретация може да се подпомогне със средствата на съвременните ГИС технологии, като видът на гравиметричните резултати предполага интегрирането им с лекота в една такава система.

4. ОПИСАНИЕ НА РАЙОНА – ФИЗИКО-ГЕОГРАФСКИ И ГЕОЛОЖКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Оптимизираната технология за установяване наличието на кухини в карстови системи е обещаващо средство, но самоцелното ѝ прилагане без предварителна оценка на района би било просто разхищение на ресурси. За обект на настоящото изследване са избрани пещерите поради тяхната значимост и предизвикателства на средата, в която са разположени. Тъй като те не се срещат навсякъде във варовика, провеждането на подобно мероприятие следва да бъде обосновано с предварителната информация. В по-детайлен аспект тези данни са необходими за планиране на измервания и последващата интерпретация на резултатите.

В световен мащаб през последните 50 години са проучени пещери с обща дължина около 30 000 km, което е едва малка част от геоложките прогнози за наличието на приблизително 10 000 000 km естествени пещерни галерии (Sauro, 2015). На територията на Балканския полуостров са изследвани и картирани над 20 000 пещери (Gunn, 2004). Това се дължи преди всичко на дългогодишните традиции в спелеоложките проучвания. Най-ранните сведения за пещерите у нас датират от 1640 г. в ръкописа на Петър Богдан (Делчев, 1979). През XIX в. се появяват няколко значими труда на братята Херман и Карел Шкорпил със съществена познавателна и научна стойност за някои от пещерите у нас, а през следващите десетилетия изследователския интерес довежда до още много открития.

Карбонатни скали, които са предпоставка за развитието на кухини, покриват 24% от територията на страната ни (Gunn, 2004). В тях са открити над 5 000 пещери.

Страната ни е поделена на четири физико-географски области: Област на Дунавската равнина, Старопланинска област, Преходна (Средногорско-Тракийска) област и Рило-Родопска област, които със своето специфично морфоструктурно развитие, дават отражение върху развитието на карста и свързаните с него пещери (Попов, 1982). Най-сложна в геоложко отношение е Преходната област, тъй като тя се намира между младонагънатата Старопланинска област и Рило-Родопския масив. В нея е образувана многоетажната, сложна и труднодостъпна пещерна система на Духлата. Нейните размери и многократно по-голямото „бяло“ петно в района провокират обясним изследователски интерес.

4.1. РЕЛЕФ, ОБЩ ГЕОЛОЖКИ И ХИДРОГЕОЛОЖКИ СТРОЕЖ НА БОСНЕШКИЯ КАРСТОВ РАЙОН

Боснешкият карстов район заема планината Голо Бърдо и част от южните склонове на Витоша (Михайлова, 2006). Неговата площ е около 30 km², а окарстените скали – варовици и доломити, заемат 23 км² от тях (по данни от Дирекцията на Природен парк „Витоша“). Релефът е планински, като надморската му височина варира от 800 m до над 1400 m.

Районът е изграден от навлечени от юг мезозойски скали върху Витошкия плутон (Михайлова, 2006). Карстът и карстовите води са формирани в триаските карбонатни скали в общ комплекс, чиято цялост е нарушена от Пернишкия разломен сноп, ориентиран по направление 120-140°. Той представлява система от успоредни разломи с разсед-отседен характер, в следствие на които са образувани хорстове и грабени помежду им. В един от хорстовете на повърхността излизат долнотриаските теригенни скали, което става причина за разделянето на Боснешкия карстов район на две отделни в хидрогеоложко отношение части. Границата между тях преминава южно от село Боснек, като по-окарстената от двете е северната.

Акумулационната тераса от валуни, чакъли и пясъци по долината на Струма е ясно изразена (Михайлова, 2006). В средната част на карбонатния комплекс, източно от Боснек, по долината на реката е отложена пачка от аргилити и алевролити с дебелина над 50 m, изклинваща на север. Тя представлява локален водоупор, който разделя комплекса на два хоризонта с оформени карстови водоносни системи. Всяка от тях започва от навлизането на реката в скалите, които са част от нея, и завършва в извор. По името на най-големите пещери във всяка от тях са наречени Врелото и Духлата. В зоната на подхранване на система Врелото, подземните води са установени в пропастните пещери Чучулян и ППД, съответно като малък поток и река дълбоко под руслото на Струма.

През Боснешкия карстов басейн преминава река Струма. Тя формира своя отток от подземните води в изветрителната зона на скалите на Витошкия плутон под Черни връх и от стичащите се валежни и топящи се снежни води (Михайлова, 2006). Високопланинските условия обуславят годишна сума от валежите по-висока от средната за страната – до 1 200 mm за станция „Черни връх“.

В района са провеждани хидроложки проучвания, които са съществени за изучаване на карстовите образувания, тъй като водата има

4. Описание на района – физико-географски и геоложки характеристики

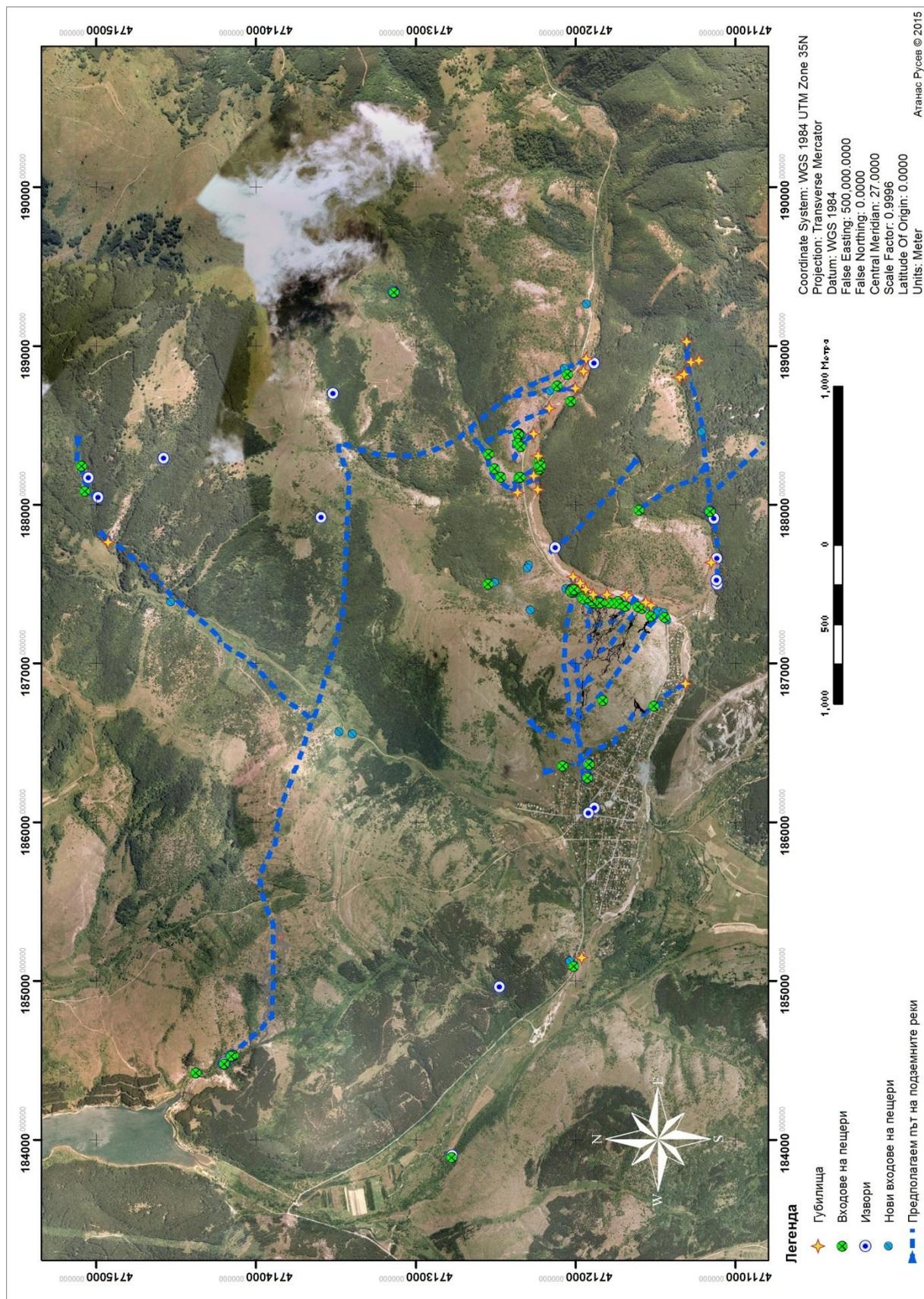
активно участие в тяхното формиране. Освен като дебит при изворите, проучванията включват и опити с оцветители за оценка на техните ресурси и интензивността на процесите. Хидрометричните изследвания доказват, че двете карстови системи – на Врелото и Духлата, се подхранват от река Струма (Михайлова, 2006).

Районът на село Боснек, Пернишка област е характерен с множеството пещери, сред които е и една от най-дългите у нас – Духлата. По данни от ДПП „Витоша“ първите писмени сведения за пещери тук са от 1900 г. От 1964 г. районът е подложен на системни спелеоложки проучвания. До 1977 г. са известни 14 пещери, сред които Духлата и Живата вода (Стрезов, 1984). До началото на 80-те години на ХХ век са открити още четири, включително Пепелянката, Академик, Врелото.

Откриването на всяка една от пещерите е свързана с опита на спелеолозите и тяхното усърдие в намирането на нови входи, проникването в тях и разкриването на продълженията им в дълбочина под земната повърхност. Трудностите пред директните изследователи се увеличават допълнително в случаи като Попов извор и Врелото, където заради сифони (галерии, изпълнени с вода) в самото им начало се търсят алтернативни варианти за проникване. По информация от ДПП „Витоша“ Врелото е и най-големият карстов извор в района.

На Фигура 7 е представена извадка от ГИС платформата за Боснешкия карстов район. Картината дава ясна и точна представа за извършените до момента открития, за установените и перспективните нови входи на пещери, както и пътят на подземните реки. Векторната информация за обектите е наложена върху растерни подложки, включващи спътникови изображения, ортофотоснимки, геоложки и топографски карти. Систематизираната в този вид информация дава богати възможности за анализ на района и планиране на изследвания. От фигурата е добре видимо, че проучванията до момента обхващат една много малка част от този изключително перспективен район.

4. Описание на района – физико-географски и геоложки характеристики



Фигура 7. Извадка от ГИС системата за Боснешкия карстов район (Русев, 2015)

4.2. ПЕЩЕРА ЖИВАТА ВОДА

Пещера Живата вода е разположена на северозападната граница на Боснешкия карстов район. Скалната основа на пещерния комплекс на Живата вода е боснекска свита (доломити), част от искърската карбонатна група, образувана през триаса – спат-аниз с възраст 247-242 млн. години (Славова, 2014).

Пещерата се намира на 3.5-4 km от Боснек в посока север-североизток в едноименната долина. До нея се достига по черен път за около 30 мин. с високопроходим автомобил или час и половина пеша.

По данни от топографските карти, входът ѝ е разположен на височина 1097 m. Хребетът над нея е ориентиран на югозапад-североизток, със среден наклон над 35%. Районът е залесен с бук и дъб (Фигура 8).

Живата вода представлява хоризонтална, моноканална пещера с дължина 150 m. В привходните ѝ части са намерени фрагменти от керамика. Днес в привходната ѝ зала се намира „неръкотворна“ икона на Богородица. Легенда твърди, че преди да се установи в Рилския манастир, Свети Иван Рилски е бил отшелник във витошка пещера, като вероятно това е именно Живата вода. Днес тя е популярен туристически обект в района.

За посещаемостта ѝ допринася и едноименният извор, намиращ се на около 100 m южно от входа ѝ, надолу по долината. Известен е заради свързаните с него легенди и издяланата от камък глава на змей, чиито творец е кладничанинът Негри Рангелов Будинов. Интересен и характерен е с водата, която ту потича силно в продължение на няколко минути, ту изчезва сякаш никога не я имало (Фигура 9). Легендата гласи, че ако водата спре, когато жаден пътник желае да пие, това е знак за греховност, а е праведен, ако продължи да тече. Според информационната табела в Боснек, изворот датира от векове, като е документиран още от османския пътешиец Евлия Челеби, живял през XVII в. Такъв природен феномен се среща само на още едно място в Европа – Френските Алпи. Причината за пулсиращия характер на извора е обект на догадки.

Живата вода е част от локална карстова система, съставена от още две самостоятелни пещери – Дълбоката и Водната (извор; известна още като Живата вода 2), през които протича подземна река, водеща началото си от губилище на повърхността, разположено в близост до Дълбоката. Прямо нея системата на Врелото се намира на югозапад, а тази на Духлата – на югозапад. На по-малко от 100 m в посока изток-югоизток от пещера Живата

4. Описание на района – физико-географски и геоложки характеристики



Фигура 8. Склонът, под който е разположена пещера Живата вода. Снимка: Атанас Русев, април 2012 г.



Фигура 9. Извор Живата вода. На снимката вляво се вижда силната водна струя, която секва само минути по-късно - на снимката вдясно, и след минути потича отново. Снимка: личен архив, юли 2013 г..

вода е входът на пещера Извора, представляваща малка, тясна галерия пълна

4. Описание на района – физико-географски и геоложки характеристики

с вода, с дължина около 25 m (Русев, 2014).

Пещера Живата вода е особено подходяща за конкретното изследване поради отличните възможности за калибриране на предложената технология. Привходните ѝ части са сравнително големи по обем и близо до повърхността, а теренът над нея позволява извършването на планираните изследвания. Развитието ѝ е хоризонтално и дълбочината ѝ под земната повърхност е обуславено от наклона на склона над нея. Същевременно районът в непосредствена близост представлява изключителен интерес както заради другите пещери, така и поради изключителния природен феномен на извор Живата вода.

4.3. ОБОБЩЕНИЕ

Боснешкият карстов район е изключително перспективна зона за проучвания поради своите геоложки и хидрогеоложки характеристики и установените пещерни системи. Направените до момента изследвания са значими, но покриват една много малка част от територията. Една от най-дългите пещерни системи у нас – тази на Духлата, заема „скромна“ част от района, а останалите открития са пръснати хаотично.

Типично за района, в непосредствена близост до пещера Живата вода се намират и други известни входове. Местността привлича вниманието и с особения едноименен пулсиращ извор, който подсказва наличието на неизвестни кухни, пораждащи любопитния феномен. Изборът на Живата вода като обект на конкретното изследване е обусловен с големия потенциал за откриване на нови кухни и същевременно удобната възможност за калибриране на гравиметричните измервания в района.

5. ПОДГОТОВКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА

Във връзка с поставената цел на изследването са планирани както наземни гравиметрични наблюдения на повърхността над пещера Живата вода, така и пространствени измервания в самата нея. Организацията на теренната работа е свързана с решаването на специфични задачи и съобразяване на редица фактори, породени от сложните теренни условия. За тяхното изпълнение е предвидена и съответната апаратура.

5.1. ПРОЕКТИРАНЕ НА НАБЛЮДЕНИЯТА

За планиране на измерванията са използвани оцифрени и геореферирани в координатна система „БГС 2005“ геоложка карта в мащаб 1:100 000, топографски карти в мащаб 1:5 000, както и ортофотоснимки. Данните са използвани като самостоятелни файлове и като част от представената по-горе ГИС система за Боснешкия карстов район.

Планирани са измервания в два последователни във времето етапа – първи, включващ подземно геодезическо заснемане на пещерата, и втори, включващ наземни гравиметрични наблюдения над нея. Целта на първия етап е получаване на тримерен пещерен модел, който впоследствие да бъде използван при интерпретацията на гравиметричните данни. Измерванията в пещерата са предвидени да бъдат извършени посредством полигонов ход, спрямо който да бъдат определени очертанията на обекта, формата и размерите, както и тяхното разположение в пространството. За изпълнението на тази задача е предвидено и създаването на работна геодезическа основа (РГО), тъй като в района на обекта такава няма.

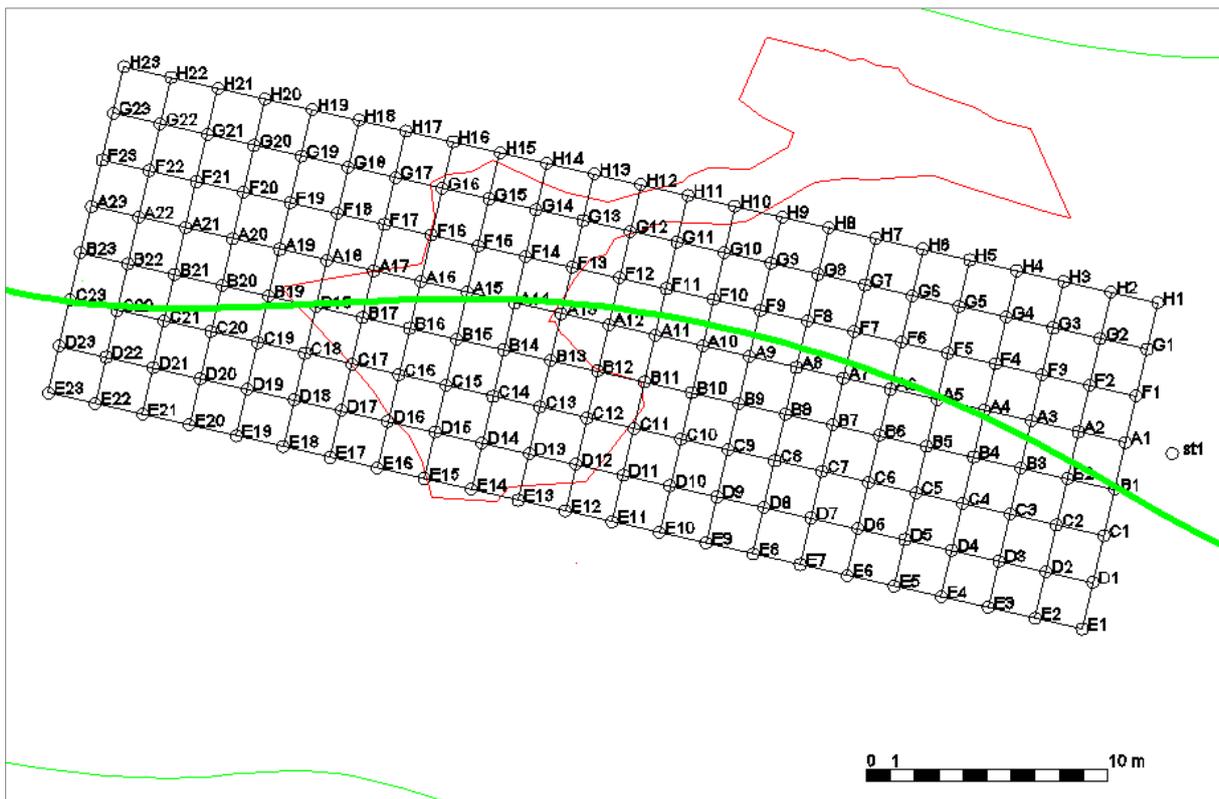
При планирането на наземните гравиметрични наблюдения са взети предвид релефът от топографска карта в мащаб 1:5 000, както и получените от заснемането параметри на пещерата. Нейният вход и север-североизточното ѝ развитие, както и дълбочината ѝ спрямо земната повърхност, са определящи за разположението, размерите и гъстотата на планираната регулярна мрежата. Ориентацията ѝ е съобразена с характера на релефа както от гледна точка на удобство при извършването на измерванията, така и защото в общия случай разположението на подземните кухини не е известно. Дългата страна на мрежата е успоредна на хоризонталите, а късата – перпендикулярна. Дължините на профилите са така определени, че една част от точките да бъдат над изследвания обект,

5. Подготовка на експеримента

докато други са сравнително отдалечени и покриват територия с неизвестна подземна структура. При южната централна част на мрежата се намира входът на пещерата, а при северната ѝ граница тя вече е на значителна дълбочина.

Предварително проектираната регулярна мрежа се състои от 8 реда по 23 точки (Фигура 10). Разстоянието между точките е 2 m, като то е обуславено от размерите на пещерата, така че да бъде осигурена висока резолюция на наблюденията с чувствителността му и към по-тесните ѝ участъци. Размерът на мрежата е приблизително 50 x 20 m.

Една от точките от РГО – st1, намиращи се в непосредствена близост до източната част на обекта, е предвидена да послужи и като базова гравиметрична станция. Мястото ѝ е особено подходящо заради стабилната основа на терена в тази част на района. Въпреки стандартните препоръки за базова точка с централна за обекта позиция, крайното ѝ разположение не е проблем поради малките размери на изследваната област.



Фигура 10. Проектираната гравиметрична мрежа. В черен цвят са съставните елементи на мрежата - направленията и възловите точки със съответните им имена; в източната част се намира т. st1. В зелен цвят са векторизираните от топографската карта хоризонтали, а с червен цвят са очертани границите на заснетата част от пещерата

Планирано е гравиметричните точки от обекта да бъдат привързани към известната абсолютна стойност на гравиметричната точка в Агенцията по геодезия, картография и кадастър. За целта е предвидена и междинна гравиметрична точка в село Боснек, като свързваща между АГКК и обекта в планината.

5.2. ИЗБОР НА ИНСТРУМЕНТИ

Селекцията на инструменти включва избор на гравиметър, подходящ за планираното гравиметрично изследване. Съобразно неговата точност и условията на терена са избрани и уреди за пространствените определения на станциите, както и за заснемането на пещера в района с цел калибриране на метода.

5.2.1. Гравиметър

За гравиметричните наблюдения е избран класическия уред LaCoste&Romberg модел G.

Производствените характеристики на инструмента включват:

- Точност - 0.04 mGal;
- Резолуция на данните - 0.005 mGal;
- Диапазон - глобален;
- Абсолютен дрейф - <1.0 mGal за месец; <0.5 mGal за месец с остаряване на уреда.

Макар че моделът е от 1959 г. и в някои отношения е остарял – например, системата за отчитане и липсата на корекции в реално време, той има известни предимства пред модерните гравиметри. Точността на уреда е достатъчно висока за извършването на планираните микрогравиметрични изследвания, а малкият му дрейф позволява реализирането на измервания в продължителни рейсове.

Поради големия наклон на терена са предвидени допълнителни принадлежности за хоризонтиране на гравиметъра, освен стандартната тринога („пиростия“), а именно клинообразни дървени подпори.

Константите на уреда са представени в Таблица 5. Превръщането на отчетите в милигали става по формулата:

$$O' = (O - O_0) \cdot K_0 + C_0 \quad (36),$$

където стойностите на K_0 и C_0 се определят за съответстващите на $O - O_0 < 100$.

Таблица 5. Константи на гравиметъра

| O_0 | K_0 | C_0 |
|-------|---------|---------|
| 3500 | 1.01495 | 3546.63 |
| 3600 | 1.01491 | 3648.12 |
| 3700 | 1.01485 | 3749.61 |
| 3800 | 1.01479 | 3851.10 |

5.2.2. ГНСС приемник

Въпреки че планираната работа включва измервания в пещерата, където няма спътников сигнал, а част от наземните измервания са в условията на гъста горска растителност, липсата на работна геодезическа основа в съчетание с лекотата, компактността и удобството е причина в изследването да бъде включен ГНСС приемник. Избраният модел Trimble Geo 7X версия Centimeter е със следните основни технически параметри:

- L1/L2 220-канален ГНСС приемник с външна антена;
- Поддържани системи: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS
- Точност в реално време: хоризонтална – 1 cm + 1 ppm; вертикална – 1.5 cm + 2 ppm;
- Точност с последваща обработка: хоризонтална – 1 cm + 1 ppm; вертикална – 1.5 cm + 1 ppm;
- Лазерен модул – до 120 m безрефлекторен обхват, до 200 m с призма; точност на разстояние – 0.05 m; точност на направление – 1.5°; точност на наклон - 0.5°.

Модерните характеристики на уреда позволяват оптимална продуктивност на работния процес в тежките условия на ограничена спътникова видимост. Интегрираната антена на уред осигурява сантиметрова точност, но за максимална прецизност и ефективност е използвана външна антена Trimble Zephyr модел 2 върху двуметров щок.

Trimble Geo 7X представлява интегрирано устройство, което освен ГНСС приемник и антена, съчетава в себе си силни компютърни характеристики и голям, удобен за работа екран. Софтуерът, с който

разполага е Trimble TerraSync 5.60 версия Centimeter, позволяващ измервания както в реално време, така и с последваща обработка. Поради невъзможността за използване на корекции в реално време в района на обекта, по-голямата част от работата е предвидено да бъде извършена при втория режим.

Важно качество на софтуера е, че позволява следене на прогнозната за последваща обработка вертикална точност на екрана на Geo 7. Освен че тя е съществена за гравиметричните изследвания, при ГНСС измерванията тя е с един порядък по-ниска от хоризонталната и постигането на изискванията за този параметър, обезпечава напълно и хоризонталните определения. Съобразно планираните гравиметрични наблюдения е определен минимален праг на вертикалната точност на стойност 13 cm. Достигането му е определящият фактор за продължителността на ГНСС наблюденията във всяка една станция.

Освен за създаването на РГО, Geo 7X със своят интегриран далекомерен модел е предвиден за грубо трасиране на точките от проектираната наземна мрежа. За целта е планирано да се използват точките от РГО, спрямо които по азимут и разстояние да бъдат определени тези от мрежата. Целта на грубото трасиране е точките да бъдат нанесени приблизително, тъй като в условията на терена – сред дървета, храсти и скали, е невъзможно да бъде спазен строго регулярния характер на предварително проектираната мрежа.

Планирано е с ГНСС приемника да бъдат определени прецизно максимално количество от трасираните точки, както и свързващата точка в село Боснек. В първия случай е предвидено да се събират данни в режим за последваща обработка, докато във втория – в реално време, съобразно покритието на мобилните оператори.

На устройството са качени наличните растерни данни като картни подложки, както и векторни – проектираната наземна мрежа и своевременно актуализираните данни за новосъздадените точки от РГО, в координатна система „БГС 2005“.

5.2.3. Тотална станция

За определяне пространственото положение на точките без или с ограичен спътников сигнал е избрана класическата технология на ъгло-дължини измервания посредством тотална станция. Инструментът Leica

5. Подготовка на експеримента

TCR303 притежава следните основни характеристики, които го правят подходящ за изпълнение на задачата:

- Измерване на ъгли – точност: 3“ (1 mgon);
- Измерване на разстояние – точност:
стандартно измерване – 2 mm + 2 ppm;
безпризмено измерване – 5 mm + 2 ppm.
- Измерване на разстояние – обхват:
измерване със стандартна призма – до 3 500 m;
безпризмено измерване – от 1.5 до 80 m;
- Либела – чувствителност:
кръгла – 6“;
електронна – 20“;
- Лазерен отвес:
максимален диаметър на отклонението на центъра на петното - \pm 0.8mm/1.5 m
диаметър на лазерното петно – 2.5 mm/1.5 m;
- Компенсатор – двуосов:
обхват: \pm 4‘ (0.07 gon);
точност: 1“ (0.3 mgon).

В практиката за заснемане на пещери са популярни далеч по-елементарни технологии за постигане на задоволителна точност в трудните за работа условия (Slavova, 2013; Slavova, 2012). Във връзка с поставената цел на конкретното изследване обаче и сравнително благоприятните условия в Живата вода – големи пространства и удобни за стационариране на уреда повърхности, е предприето извършването на високоточни измервания. Измерванията между полигоновите точки и тяхното привързване към РГО е предвидено да става с насочване на тоталната станция към призма в съседните точките, а за подробните точки е планирано безрефлекторно заснемане.

Освен за измервания в пещерата, използването на тоталната станция е подходящо за определяне плановото положение на част от наземните точки. Предвид стръмните склонове и късите визури, при които ефектът на вертикалната рефракция не е значим, прилагането на тригонометрична нивелация също е целесъобразно. За този етап от работата е предвидено визурите да бъдат към четириметрова дървена лата – от една страна защото това подобрява възможностите за видимост на сигнала във всяка една точка,

от друга, защото плановете определения на точките не са ограничени от толкова строги изисквания, колкото вертикалните.

5.3. ОБОБЩЕНИЕ

Наблюденията са проектирани посредством наличните материали за района, в това число текстови и графични източници, както и наличната ГИС система. Те са планирани в два етапа – първи, включващ заснемане на пещера Живата вода, и втори, включващ същинските гравиметрични наблюдения. При проектирането на регулярна мрежа за втория етап са използвани и данни от извършеното картиране.

Оборудването включва гравиметър LCR G с висока точност и ниски стойности на дрейфа. За пространствените определения поради липса на РГО са планирани ГНСС измервания, които да бъдат допълнени с тотална станция в точки без или с ограничена спътникова видимост.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ НА ИЗМЕРВАНИЯТА

Планираните измервания са разпределени в няколко отделни задачи. Пространствените определения, включват прецизно заснемане на пещерата и гравиметричните станции. Гравиметричните измервания са разширени с допълнителни изследвания на дрейфа на инструмента.

6.1. ПРОСТРАНСТВЕНИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Измервания и съставяне на примерни пещерни модели са извършвани в предходни измервания (Slavova, 2013; Slavova, 2012), които служат като основа на настоящото. Пространствените определения включват измервания с ГНСС приемник, когато условията го позволяват, и работа с тотална станция във всички останали случаи.

6.1.1. Заснемане на пещерата

Създаването на РГО с ГНСС апаратурата е подготвителен етап за измерванията в пещерата, поради необходимостта те да бъдат ориентирани в пространството посредством привързване към точки с известни координати. За целта три от точките са разположени по-високо спрямо входа на пещерата, в малък район без дървета, на открито за максимално добра спътникова видимост. Непосредствено пред входа на пещерата е разположена четвърта точка. Всички те са стабилизирани с метални пирони.

За определяне пространственото положение на тези четири точки, на всяка от тях с ГНСС приемника Trimble Geo 7X са извършени статични измервания с интервал 1 секунда. Най-дълъг е престоят на т. st1 – 54 мин., а най-кратък – st.4 – 31 мин.

Паралелно на ГНСС измерванията отвън, са извършени ъглово-дължинните измервания под земята и тяхното привързване към точките от РГО. В пещерата е създаден полигонов ход, чиито точки не са стабилизирани с трайни знаци, за да не се извършват нарушения на средата. Разположението им е определено преди всичко от видимостта помежду им, както и възможността за заснемане на характерните пещерни форми (Фигура 11). Полигоновият ход е затворен в началната си точка, намираща се непосредствено пред входа на пещерата, която е и използвана за привързване към РГО.

Характерна разлика при извършеното заснемане в сравнение с класическия похват в пещерното картиране е съответно измерванията към

6. Реализация на измерванията

множество подробни точки от една станция вместо очертаване на напречния профил с четири визури (горе, долу, ляво и дясно). За разграничаване на тавани и стените от пода точките са означавани с кодове.

Общата дължина на полигоновия ход е 67 m и включва 7 точки. От четири от тях са заснети 344 подробни точки, които да апроксимират пещерното тяло в съответствие с чувствителността на гравиметричния метод. Всички дейности по създаване на РГО, полигонов ход и заснемане на пещерата са реализирани в един ден.



Фигура 11. Измервания с тоталната станция в пещерата, изглед от привходната зала към началото на галерията. На снимката ясно личи характерът на пещерния профил, както и хориознталният под, който благоприятства работата

6.1.2. Трасиране на гравиметричната мрежа

Трасирането на точките е подготвителен етап за извършване на планираните гравиметрични наблюдения, поради което ги предхожда във времето. Поради липсата на мобилни комуникации в района на Живата вода, с което се ограничава качеството на ГНСС измерванията в реално време, е предвидено действието да се осъществи по полярен метод (чрез азимут и разстояние) с интегрирания далекомерен модул на Trimble Geo 7X.

Първоначално определената за начална точка st1 (както и останалите точки от създадената РГО) са унищожени в промеждутъка от време между тяхното създаване (декември 2013 г.) и трасирането (юли 2014 г.). Въпреки това на приблизително същото място на точка st1 с метален пирон е стабилизирана нова точка CS.

Поради сложните условия на терена и най-вече ограничения в пряката видимост между точките, се налага поэтапно трасиране от новосъздадените точки, съблюдавайки проектните разстояния помежду им и стойностите на азимута по двете основни направления, определени от надлъжните и напречните профили. Заради сложния релеф, наличието на дървета, храсти и скали не са спазвани строго предварително проектираните местоположения. По същата причина няколко от крайните точки също са премахнати (D1, E1, F23, G23, H23). Всички точки от мрежата са стабилизирани с дървени колчета.

6.1.3. Прецизно заснемане на гравиметричните станции

Междинната гравиметрична станция в село Боснек е определена с ГНСС приемника Trimble Geo 7X в реално време, благодарение на наличния интернет достъп до VRS корекции на сертифицирана ГНСС инфраструктурна мрежа.

Липсата на клетъчно покритие в района на Живата вода е причина измерванията там да бъдат извършени в режим на последваща обработка. Допълнителен, усложняващ ГНСС наблюденията фактор, е разположението на обекта на склон в сърцето на планината, което предполага ограничена спътникова видимост. Много по-съществена пречка обаче е наличието на гъста дъбово-букова горска растителност. Въпреки това са извършени неколкодневни наблюдения на 61 точки.

Поддържането на сигналите от редица ГНСС системи за позициониране е съществено предимство на Geo 7X в условията на нарушената от дървесните корони спътникова видимост. Със сравнително кратко времетраене (няколко минути) са наблюденията в централната източна и североизточна част на мрежата, където небосклонът е открит. Под короните на дърветата (Фигура 12) обаче се налагат продължителни наблюдения (половин час и повече) за постигане на съобразената с изискванията прогнозна точност, което рязко намаляват продуктивността.



Фигура 12. ГНСС измервания на точка E2. Въпреки видимо гъстата сянка на дърветата, това е една от станциите с успешни ГНСС измервания

Трудните ГНСС условия са причина по-голяма част от точките да бъдат определени с тотална станция. Основно предизвикателство при визуирите към всяка точка е затруднената пряка видимост поради значителната растителност. Заради ниските клони е използвана само половината дължина на четириметровата лата.

Измерванията с тоталната станция са реализирани в общо четири дни, като всички точки са обхванати от общо две станции – CS и H13.

6.2. ГРАВИМЕТРИЧНИ ИЗМЕРВАНИЯ

Гравиметричните измервания са извършени според указанията за ползване на LRC G (LaCoste & Romberg, 2004) и установените практики.

Всеки цикъл гравиметрични измервания е придружен от допълнителни изследвания на инструменталния дрейф, реализирани в началото и края (при по-продължителните измервания) на периода.

6.2.1. Изследвания на дрейфа на гравиметъра

Изследването е реализирано в дневни измервания през половин час, в групи по пет отчета с точност до хилядна, впоследствие превърнати в милигали и осреднени. Продължителността на дневните наблюдения е съобразена с продължителността на гравиметричните рейсове по време на същинските гравиметрични наблюдения на Живата вода.

Всички изследвания са проведени на едно и също място (т. нар. станция Yana), представляващо частично вкопана в земята постройка в слабораселено място, далеч от смущаващи фактори с антропогенен характер. Уредът е станциониран на бетонна основа, осигуряващ максимална стабилност, както за получаване на отделните отчети, така и за осигуряване на хоризонталност на уреда в продължение на целодневните наблюдения.

6.2.2. Същински гравиметрични измервания

Непосредствено след трасирането на гравиметричната мрежа е поставено началото на гравиметричните наблюдения (Фигура 13). Тъй като основата на почти всички станции е почва, покрита с трева или листна маса, тя е особено нестабилна. По тази причина, стремежът е измерванията на всяка станция да се осъществяват максимално бързо и същевременно с леки и внимателни движения, за да не се наруши хоризонталността на уреда. На всяка станция се извършват отчети до получаване на два последователни еднакви, с точност до стотна. Обичайният престой на всяка станция е около 10 минути, но не липсват и по-продължителни изключения.



Фигура 13. Гравиметрични измервания в източната част на мрежата. Край уреда се виждат външният му акумулатор, хартиените карнети, както и част от съседните точки, маркирани с дървени колчета

Измерванията на всички точки от мрежата са реализирани в девет дни, разпределени в два цикъла, включващи четири дни през юли 2014 г. и пет дни през септември 2014 г. Вторият цикъл е изпълнен паралелно с прецизното заснемане на станциите.

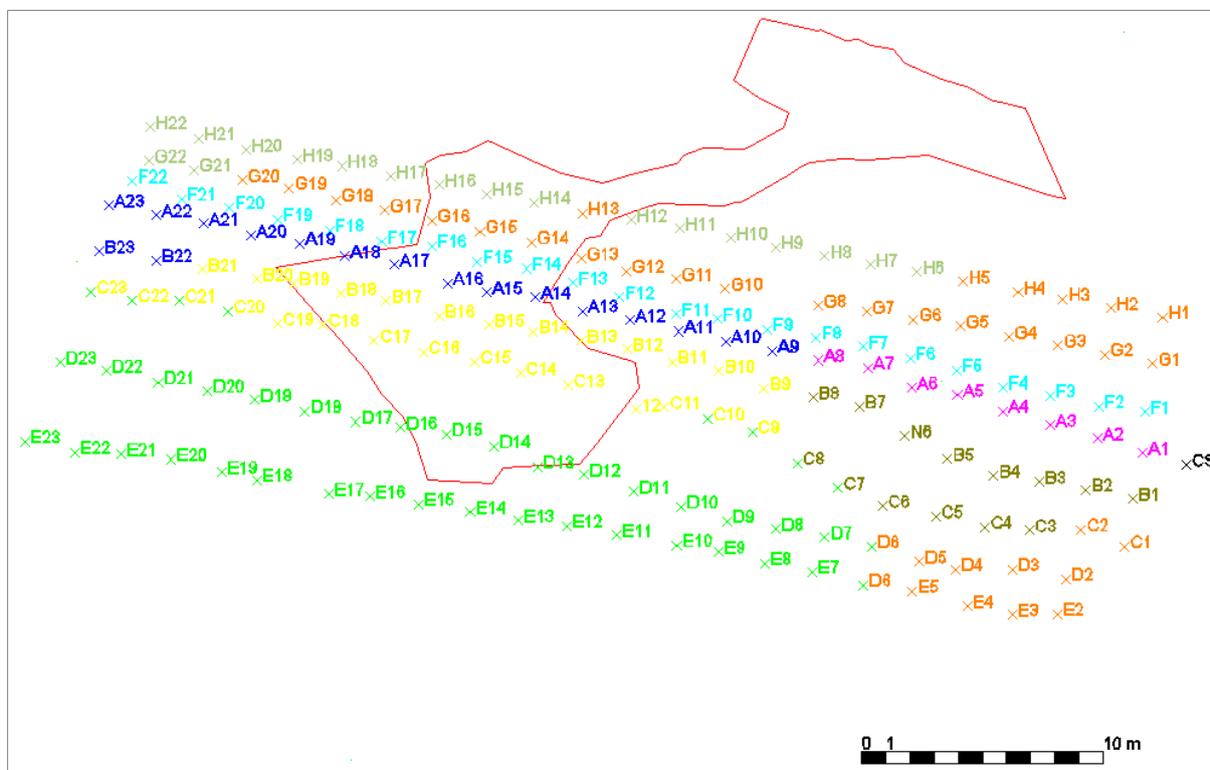
Ежедневните наблюдения, с малки изключения, са реализирани по схемата BF-CS-точки от мрежата-CS-BF, където BF е базовата точка в село Боснек, а CS е базовата точка на Живата вода. Последователността на работа върху точките от мрежата е предимно по надлъжни профили заради сходните им коти и съответно близките стойности на гравиметричните отчети, което улеснява работата.

В един ден от първия цикъл е извършено и привързването на мрежата с абсолютната гравиметрична точка в АГКК по схемата АГКК-BF-АГКК.

При последващата обработка на данните е установена висока стойност на дрейфа на инструмента в последния ден от втория цикъл измервания, поради което са планирани и осъществени повторни измервания на същите точки. Новият, трети цикъл е реализиран в един ден през юни 2015 г., около половин година след втория цикъл. Тъй като

6. Реализация на измерванията

колчетата, означаващи някои от точките, са премахнати (D17, E12, E18), въпросните са повторно трасирани с ролетка. Схема на наблюденията е представена на Фигура 14.



Фигура 14. Схема на извършените гравиметрични измервания. С черен цвят е отбелязана базовата станция CS, а с различни цветове – точките от мрежата, според дните, в които са измерени; точките, чието място е обозначено с един цвят, а номерът - с друг, са измерени повторно в различни дни. С червен цвят е обозначено местоположението на пещерата

6.3. ОБОБЩЕНИЕ

Измерванията са извършени в съответствие с предварително определените изисквания. Заснемането на пещерата (декември 2013 г.), предшества началото на гравиметричните измервания с половин година, а трасирането на гравиметричната мрежа е извършено непосредствено преди тях (юли 2014 г.). Гравиметричните измервания са реализирани в три цикъла с разстояние във времето от месец между първи и втори цикъл (септември 2014 г.) и девет месеца месеца между втори и трети (юни 2015 г.). Всеки цикъл гравиметрични наблюдения е придружен с изследвания на дрейфа на гравиметъра.

6. Реализация на измерванията

Прецизните пространствени определения на гравиметричните станции са извършени успоредно с първия цикъл гравиметрични измервания. При третия цикъл няколко станции са унищожени, поради което са трасирани повторно.

7. ОБРАБОТКА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Обработката на данните е разпределена от гледна точка на поставените задачи и използвания софтуер за тяхното решаване. Използвани са както комерсиални софтуерни продукти, така специално предоставени частни и лични програмни разработки за обработка и визуализация.

Извършен е анализ на данните в специфичните етапи от обработката с избор на параметри, които да бъдат приложени в следващите стъпки. Резултатите са интерпретирани в контекста на предложената технологична оптимизация.

7.1. ОБРАБОТКА НА ПРОСТРАНСТВЕНИТЕ ДАННИ

Обработката на пространствените данни включва тези от ГНСС измерванията, от тоталната станция, както и тяхното съвместяване. Получените резултати са използвани за генериране на тримерен цифров модел на пещера, координати на гравиметричните станции и извличане на информация за взаимното им положение.

7.1.1. Координатите на точките от РГО

Поради невъзможността за извършване на ГНСС измервания с необходимата точност в реално време, е извършена последваща обработка със софтуер Trimble Business Center 2.40⁴. Получените при обработката координати и точности са представени в Таблица . Съобразно (Агенция по геодезия, картография и кадастър (АГКК), 2011) на изискванията за РГО, определени в раздел III, чл. 30 и чл. 31 отговарят точки с номера st1 и st2.

Таблица 3. Координати и точност на точките от РГО

| Точка | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | ms, [m] | mh, [m] | rms, [m] |
|-------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|---------|----------|
| st1 | 4710437.25 | 680940.50 | 1148.79 | 0.01 | 0.01 | 0.05 |
| st2 | 4710496.98 | 680956.82 | 1176.11 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| st3 | 4710492.82 | 680948.04 | 1174.44 | 0.02 | 0.04 | 0.12 |
| st4 | 4710432.19 | 680912.19 | 1139.30 | 0.41 | 0.42 | 0.23 |

⁴ Обработката е извършена от д-р инж. Аспарух Камбуров, Минно-геоложки университет.

7.1.2. Координатите на полигоновите и подробните точки

Измерванията за получаване на тримерния модел на пещерата са обработени с българския софтуер TPLAN. Определените с ГНСС приемника изходни точки са въведени в TPLAN след трансформация от координатна система „БГС 2005“ към „Система 1970“, зона К-9 и Балтийска височинна система с официалния софтуер на АГКК BGSTrans (АГКК, 2012). Отпадналите като дадени ГНСС точки st3 и st4 участват в изравнението като новоопределяеми с имена съответно pt1 и pt4.

Получените координати и точност на точките от РГО и полигоновия ход в пещерата са представени в Таблица . Точка pt8 е с максимална средна квадратна грешка по положение – 9.8 mm, което е обяснимо с разположението ѝ в най-вътрешната изследвана част на пещерата. Точка pt1, която съвпада с st3, има най-ниска вертикална точност – 41.5 mm, която е от същия порядък на точността, с която е определена посредством ГНСС технологията; хоризонталната ѝ точност е по-висока. Разликите в координатите и котите между точките st3/pt1 и st4/pt4 е обяснима с точността на измерванията.

Таблица 4. Координати и точност на точките от полигоновия ход

| Точка | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | ms, [m] | mh, [m] |
|-------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|---------|
| pt1 | 4710492.82 | 680948.02 | 1174.34 | 0.01 | 0.04 |
| pt4 | 4710432.35 | 680912.14 | 1138.37 | 0.01 | 0.02 |
| pt5 | 4710441.72 | 680911.34 | 1139.02 | 0.01 | 0.03 |
| pt6 | 4710448.27 | 680911.42 | 1139.16 | 0.01 | 0.03 |
| pt7 | 4710449.10 | 680921.78 | 1138.72 | 0.01 | 0.03 |
| pt8 | 4710452.42 | 680928.20 | 1139.07 | 0.01 | 0.03 |
| pt9 | 4710448.26 | 680911.42 | 1139.12 | 0.01 | 0.03 |
| pt10 | 4710449.10 | 680921.79 | 1138.70 | 0.01 | 0.03 |

7.1.3. Тримерен пещерен модел

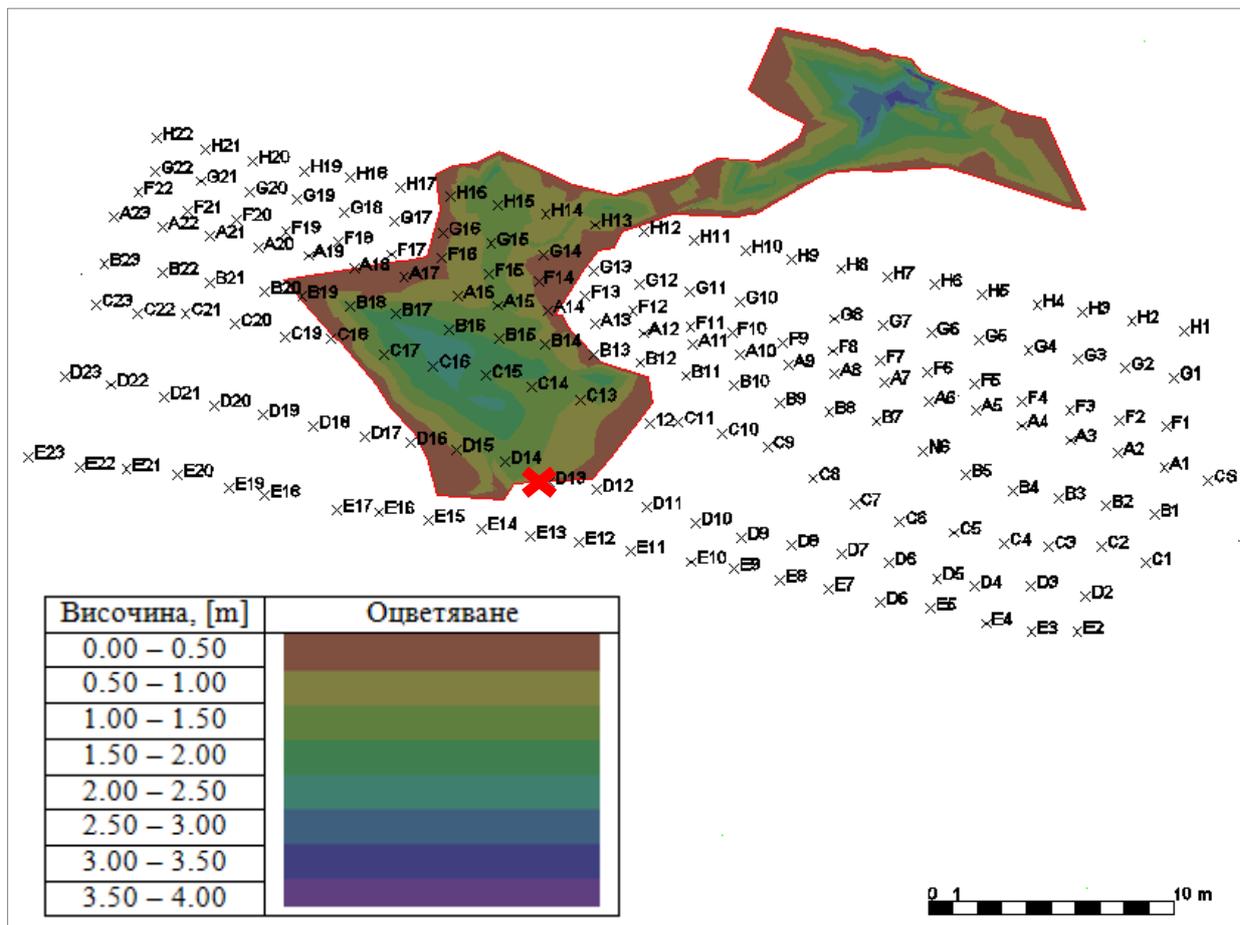
Методът, по който е заснета пещерата, обуславя използването на различен софтуерен продукт от обичайно използваните в практиката на пещерното картиране. Пространствените координати на подробните точки са използвани за създаването на тримерен модел на пещера Живата вода в среда на AutoCAD Civil 3D 2010. Продуктът е използван за изчертаване на триъгълен нерегулярен модел (т. нар. TIN – Triangulated Irregular Network),

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

апроксимиращ пещерното тяло На Фигура 15 с хипсометрично оцветяване е представена височината на пещерата.

С въведените при заснемането кодове точки са групирани в състава на две повърхнини – една на тавана и стените и втора на пода, между които е заключен пещерния обем. При създаването на модела са зададени структурните линии, които очертават характерния пещерен профил.

Обемът на заснетата част от пещерата е 169.09 m^3 . Максималната височина е 3.54 m , а средната – 0.93 m .



Фигура 15. Планов изглед на пещерния модел. С червен "x" е отбелязан входът на пещерата, а с черен цвят са означение точките от гравиметричната мрежа

7.1.4. Координати и точност на гравиметричните станции

Последващата обработка на ГНСС измерванията е извършена със софтуера GPS Pathfinder Office 5.60. Резултатите са представени в Таблица . Една част от точките не отговарят на поставените изисквания за вертикална точност ($< 13 \text{ cm}$), но в хоризонтално отношение са добре определени, поради което те участват в плановото изравнение.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Таблица 5. Координати и точност на определените с ГНСС гравиметрични станции

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | H _{WGS84} , [m] | ms, [mm] | mh, [mm] |
|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|
| BF | 42.4972216 | 23.1770808 | 961.517 | 0.02 | 0.02 |
| CS | 42.5251476 | 23.2029646 | 1148.694 | 0.01 | 0.02 |
| A1 | 42.5251525 | 23.2029430 | 1148.461 | 0.01 | 0.01 |
| A2 | 42.5251583 | 23.2029203 | 1148.336 | 0.01 | 0.01 |
| A3 | 42.5251636 | 23.2028965 | 1148.027 | 0.01 | 0.02 |
| A4 | 42.5251695 | 23.2028732 | 1147.671 | 0.01 | 0.03 |
| A5 | 42.5251759 | 23.2028502 | 1147.597 | 0.01 | 0.04 |
| A6 | 42.5251791 | 23.2028273 | 1147.467 | 0.07 | 0.13 |
| A7 | 42.5251870 | 23.2028057 | 1147.363 | 0.02 | 0.05 |
| A8 | 42.5251903 | 23.2027807 | 1146.892 | 0.01 | 0.03 |
| A9 | 42.5251847 | 23.2027303 | 1150.133 | 0.49 | 0.78 |
| A10 | 42.5251985 | 23.2027315 | 1146.128 | 0.40 | 0.46 |
| A11 | 42.5252001 | 23.2027062 | 1146.900 | 0.05 | 0.04 |
| A12 | 42.5252076 | 23.2026792 | 1147.621 | 0.58 | 0.61 |
| A13 | 42.5252103 | 23.2026678 | 1147.535 | 0.21 | 0.35 |
| A14 | 42.5252165 | 23.2026393 | 1146.063 | 0.02 | 0.03 |
| A15 | 42.5252189 | 23.2026147 | 1145.955 | 0.02 | 0.02 |
| A16 | 42.5252227 | 23.2025949 | 1149.388 | 0.04 | 0.05 |
| A17 | 42.5252302 | 23.2025682 | 1146.310 | 0.02 | 0.03 |
| A18 | 42.5252345 | 23.2025438 | 1146.668 | 0.06 | 0.11 |
| A19 | 42.5252392 | 23.2025211 | 1146.709 | 0.01 | 0.03 |
| A20 | 42.5252424 | 23.2024964 | 1146.899 | 0.02 | 0.04 |
| A21 | 42.5252474 | 23.2024729 | 1146.824 | 0.03 | 0.08 |
| A22 | 42.5252523 | 23.2024469 | 1148.118 | 0.27 | 0.61 |
| A23 | 42.5252551 | 23.2024254 | 1147.325 | 0.18 | 0.42 |
| B23 | 42.5252381 | 23.2024196 | 1146.014 | 0.03 | 0.03 |
| B22 | 42.5252362 | 23.2024476 | 1145.736 | 0.13 | 0.28 |
| B21 | 42.5252226 | 23.2024584 | 1147.724 | 0.31 | 0.34 |
| B20 | 42.5252405 | 23.2024919 | 1142.929 | 0.09 | 0.21 |
| B19 | 42.5252242 | 23.2025175 | 1145.748 | 0.02 | 0.04 |
| B18 | 42.5252182 | 23.2025362 | 1146.934 | 0.08 | 0.19 |
| B17 | 42.5252167 | 23.2025639 | 1145.507 | 0.03 | 0.03 |
| B16 | 42.5252150 | 23.2025911 | 1147.598 | 0.53 | 0.67 |
| B15 | 42.5252068 | 23.2026149 | 1145.511 | 0.04 | 0.09 |
| B14 | 42.5252038 | 23.2026376 | 1145.402 | 0.02 | 0.02 |
| B13 | 42.5252000 | 23.2026617 | 1145.474 | 0.01 | 0.02 |
| B12 | 42.5251964 | 23.2026846 | 1145.679 | 0.02 | 0.03 |
| B11 | 42.5251918 | 23.2027075 | 1145.546 | 0.08 | 0.16 |
| B10 | 42.5251874 | 23.2027305 | 1145.806 | 0.04 | 0.10 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | H _{WGS84} , [m] | ms, [mm] | mh, [mm] |
|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|
| B9 | 42.5251812 | 23.2027380 | 1146.833 | 0.08 | 0.20 |
| C9 | 42.5251641 | 23.2027465 | 1144.351 | 0.02 | 0.04 |
| C10 | 42.5251694 | 23.2027243 | 1144.588 | 0.01 | 0.04 |
| C11 | 42.5251740 | 23.2027025 | 1144.501 | 0.03 | 0.06 |
| C12 | 42.5251737 | 23.2026882 | 1149.062 | 0.02 | 0.03 |
| C13 | 42.5251760 | 23.2026511 | 1148.300 | 0.09 | 0.10 |
| C14 | 42.5251897 | 23.2026291 | 1145.438 | 0.22 | 0.57 |
| C15 | 42.5251934 | 23.2026072 | 1144.470 | 0.11 | 0.16 |
| C16 | 42.5251977 | 23.2025814 | 1144.779 | 0.05 | 0.25 |
| C17 | 42.5252018 | 23.2025572 | 1144.729 | 0.03 | 0.03 |
| C18 | 42.5252115 | 23.2025402 | 1147.042 | 0.28 | 0.54 |
| C19 | 42.5252096 | 23.2025101 | 1146.782 | 0.07 | 0.41 |
| C20 | 42.5252080 | 23.2024826 | 1148.579 | 0.26 | 0.44 |
| C21 | 42.5252169 | 23.2024555 | 1147.220 | 0.30 | 0.38 |
| C22 | 42.5252213 | 23.2024164 | 1144.415 | 0.25 | 0.25 |
| C23 | 42.5252203 | 23.2024129 | 1145.388 | 0.04 | 0.08 |
| H5 | 42.5252184 | 23.2028547 | 1149.993 | 0.01 | 0.02 |
| H13 | 42.5252487 | 23.2026663 | 1149.905 | 0.07 | 0.05 |
| B8 | 42.5251765 | 23.2027775 | 1145.871 | 0.02 | 0.05 |
| E2 | 42.5250927 | 23.2028977 | 1143.400 | 0.03 | 0.04 |
| E14 | 42.5251215 | 23.2025787 | 1144.706 | 0.19 | 0.21 |
| E23 | 42.5251675 | 23.2023796 | 1142.965 | 0.02 | 0.04 |
| H22 | 42.5252842 | 23.2024471 | 1147.936 | 0.02 | 0.07 |
| H1 | 42.5252031 | 23.2029548 | 1151.677 | 0.01 | 0.02 |

Обработката на ъглово-дължинните измервания с ТПЛАН е осъществена на няколко етапа. Първоначално в нивелачното изравнение като дадени са включени всички точки от Таблица , чиято вертикална точност отговаря на поставения критерий, а в плановото изравнение участват всички ГНСС точки. Резултатите от това първо изравнение не са удовлетворяващи, но насочват вниманието към проблемните за мрежата точки и измервания. След поредица от последователни изравнения, анализи и отстраняване на дадени точки и измервания, се достига до посочените в Таблица окончателни резултати. Със сив цвят са маркирани полетата на всички станции, в които са извършени ГНСС измервания, а с удебелен шрифт са подчертани онези от тях, чиито ГНСС данни са използвани като дадени. С обикновен шрифт са новоопределените стойности вследствие на плановото/нивелачно изравнение с ТПЛАН.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Максималната средна квадратна грешка в планово положение е 0.07 m (т. А6), а във вертикално – 0.04 m (Е23). Стойностите удовлетворяват напълно изискванията за точност на координатите на гравиметричните станции.

Установено е, че по време на заснемането на гравиметричната мрежа, са пропуснати измервания на G9, поради което тя е изключена от по-нататъшната обработка на данните.

Таблица 6. Координати и точност на гравиметричната мрежа

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | H _{EVRS} , [m] | ms, [m] | mh, [m] |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| AGKK ⁵ | 42.6677778 | 23.2680556 | 4726417.05 | 685862.36 | 607.71 | 562.96 | - | - |
| BF | 42.4972216 | 23.1770808 | 4707281.19 | 678894.06 | 961.52 | 916.13 | 0.02 | 0.02 |
| CS | 42.5251476 | 23.2029646 | 4710437.20 | 680940.47 | 1148.69 | 1103.287 | 0.01 | 0.02 |
| A1 | 42.5251525 | 23.2029431 | 4710437.70 | 680938.67 | 1148.46 | 1103.056 | 0.01 | 0.01 |
| A2 | 42.5251583 | 23.2029203 | 4710438.30 | 680936.78 | 1148.34 | 1102.931 | 0.01 | 0.01 |
| A3 | 42.5251636 | 23.2028967 | 4710438.84 | 680934.83 | 1148.03 | 1102.622 | 0.01 | 0.02 |
| A4 | 42.5251694 | 23.2028731 | 4710439.44 | 680932.87 | 1147.79 | 1102.386 | 0.01 | 0.01 |
| A5 | 42.5251758 | 23.2028503 | 4710440.10 | 680930.98 | 1147.60 | 1102.192 | 0.01 | 0.04 |
| A6 | 42.5251792 | 23.2028272 | 4710440.42 | 680929.08 | 1147.43 | 1102.022 | 0.07 | 0.01 |
| A7 | 42.5251869 | 23.2028056 | 4710441.24 | 680927.28 | 1147.30 | 1101.892 | 0.02 | 0.02 |
| A8 | 42.5251903 | 23.2027808 | 4710441.55 | 680925.24 | 1146.89 | 1101.487 | 0.01 | 0.03 |
| A9 | 42.5251942 | 23.2027578 | 4710441.94 | 680923.33 | 1146.52 | 1101.11 | 0.04 | 0.01 |
| A10 | 42.5251983 | 23.2027342 | 4710442.35 | 680921.38 | 1146.44 | 1101.028 | 0.06 | 0.01 |
| A11 | 42.5252025 | 23.2027108 | 4710442.76 | 680919.45 | 1146.30 | 1100.889 | 0.06 | 0.01 |
| A12 | 42.5252072 | 23.2026864 | 4710443.23 | 680917.43 | 1146.24 | 1100.83 | 0.06 | 0.01 |
| A13 | 42.5252111 | 23.2026625 | 4710443.61 | 680915.46 | 1146.23 | 1100.82 | 0.06 | 0.01 |
| A14 | 42.5252165 | 23.2026393 | 4710444.18 | 680913.53 | 1146.06 | 1100.656 | 0.02 | 0.03 |
| A15 | 42.5252189 | 23.2026147 | 4710444.38 | 680911.51 | 1145.96 | 1100.548 | 0.02 | 0.02 |
| A16 | 42.5252228 | 23.2025950 | 4710444.77 | 680909.88 | 1146.08 | 1100.673 | 0.04 | 0.01 |
| A17 | 42.5252302 | 23.2025682 | 4710445.54 | 680907.67 | 1146.31 | 1100.903 | 0.02 | 0.03 |
| A18 | 42.5252339 | 23.2025436 | 4710445.89 | 680905.63 | 1146.60 | 1101.195 | 0.06 | 0.01 |
| A19 | 42.5252392 | 23.2025211 | 4710446.43 | 680903.76 | 1146.71 | 1101.302 | 0.01 | 0.03 |
| A20 | 42.5252425 | 23.2024964 | 4710446.74 | 680901.72 | 1146.90 | 1101.494 | 0.02 | 0.04 |
| A21 | 42.5252475 | 23.2024728 | 4710447.25 | 680899.77 | 1146.90 | 1101.488 | 0.03 | 0.02 |
| A22 | 42.5252511 | 23.2024492 | 4710447.60 | 680897.82 | 1146.92 | 1101.508 | 0.06 | 0.02 |
| A23 | 42.5252553 | 23.2024253 | 4710448.01 | 680895.85 | 1146.79 | 1101.383 | 0.06 | 0.02 |
| B1 | 42.5251353 | 23.2029375 | 4710435.78 | 680938.27 | 1147.98 | 1102.577 | 0.06 | 0.01 |
| B2 | 42.5251392 | 23.2029139 | 4710436.16 | 680936.31 | 1147.20 | 1101.794 | 0.06 | 0.01 |
| B3 | 42.5251425 | 23.2028906 | 4710436.48 | 680934.39 | 1146.75 | 1101.34 | 0.06 | 0.01 |

⁵ По данни от (Милев, Михайлов, Цанков, & Димовски, 2013), означена под номер 5001 (София-Павлово)

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | H _{EVRS} , [m] | ms, [m] | mh, [m] |
|-----|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| B4 | 42.5251453 | 23.2028675 | 4710436.74 | 680932.49 | 1146.31 | 1100.905 | 0.06 | 0.01 |
| B5 | 42.5251519 | 23.2028444 | 4710437.43 | 680930.57 | 1146.14 | 1100.736 | 0.06 | 0.01 |
| B6 | 42.5251611 | 23.2028233 | 4710438.41 | 680928.81 | 1145.91 | 1100.507 | 0.06 | 0.02 |
| B7 | 42.5251725 | 23.2028008 | 4710439.62 | 680926.93 | 1146.27 | 1100.865 | 0.06 | 0.02 |
| B8 | 42.5251764 | 23.2027775 | 4710440.00 | 680925.00 | 1146.03 | 1100.622 | 0.02 | 0.01 |
| B9 | 42.5251803 | 23.2027531 | 4710440.38 | 680922.99 | 1145.86 | 1100.456 | 0.06 | 0.02 |
| B10 | 42.5251872 | 23.2027306 | 4710441.11 | 680921.12 | 1145.75 | 1100.338 | 0.04 | 0.02 |
| B11 | 42.5251911 | 23.2027069 | 4710441.49 | 680919.17 | 1145.68 | 1100.271 | 0.05 | 0.01 |
| B12 | 42.5251964 | 23.2026844 | 4710442.03 | 680917.30 | 1145.68 | 1100.274 | 0.02 | 0.03 |
| B13 | 42.5252000 | 23.2026617 | 4710442.38 | 680915.42 | 1145.48 | 1100.069 | 0.01 | 0.02 |
| B14 | 42.5252039 | 23.2026375 | 4710442.76 | 680913.43 | 1145.40 | 1099.997 | 0.02 | 0.02 |
| B15 | 42.5252067 | 23.2026150 | 4710443.02 | 680911.57 | 1145.50 | 1100.089 | 0.04 | 0.01 |
| B16 | 42.5252106 | 23.2025903 | 4710443.40 | 680909.53 | 1145.22 | 1099.812 | 0.06 | 0.01 |
| B17 | 42.5252167 | 23.2025639 | 4710444.02 | 680907.34 | 1145.51 | 1100.1 | 0.03 | 0.03 |
| B18 | 42.5252200 | 23.2025411 | 4710444.34 | 680905.46 | 1145.79 | 1100.378 | 0.06 | 0.02 |
| B19 | 42.5252242 | 23.2025175 | 4710444.75 | 680903.51 | 1145.75 | 1100.341 | 0.02 | 0.04 |
| B20 | 42.5252261 | 23.2024992 | 4710444.93 | 680902.00 | 1146.03 | 1100.627 | 0.06 | 0.02 |
| B21 | 42.5252303 | 23.2024717 | 4710445.33 | 680899.73 | 1146.16 | 1100.748 | 0.06 | 0.02 |
| B22 | 42.5252342 | 23.2024486 | 4710445.72 | 680897.82 | 1146.17 | 1100.763 | 0.05 | 0.02 |
| B23 | 42.5252381 | 23.2024197 | 4710446.09 | 680895.44 | 1146.02 | 1100.609 | 0.03 | 0.03 |
| C1 | 42.5251175 | 23.2029325 | 4710433.80 | 680937.91 | 1147.03 | 1101.619 | 0.06 | 0.01 |
| C2 | 42.5251242 | 23.2029108 | 4710434.49 | 680936.11 | 1146.24 | 1100.83 | 0.06 | 0.01 |
| C3 | 42.5251244 | 23.2028847 | 4710434.46 | 680933.96 | 1145.08 | 1099.67 | 0.06 | 0.01 |
| C4 | 42.5251261 | 23.2028625 | 4710434.60 | 680932.13 | 1145.19 | 1099.781 | 0.06 | 0.01 |
| C5 | 42.5251306 | 23.2028378 | 4710435.04 | 680930.09 | 1144.63 | 1099.218 | 0.04 | 0.01 |
| C6 | 42.5251350 | 23.2028111 | 4710435.48 | 680927.88 | 1144.06 | 1098.648 | 0.04 | 0.01 |
| C7 | 42.5251422 | 23.2027889 | 4710436.23 | 680926.04 | 1144.01 | 1098.607 | 0.06 | 0.02 |
| C8 | 42.5251519 | 23.2027686 | 4710437.27 | 680924.35 | 1144.14 | 1098.732 | 0.04 | 0.01 |
| C9 | 42.5251642 | 23.2027464 | 4710438.58 | 680922.48 | 1144.34 | 1098.935 | 0.02 | 0.02 |
| C10 | 42.5251694 | 23.2027242 | 4710439.12 | 680920.64 | 1144.46 | 1099.052 | 0.01 | 0.01 |
| C11 | 42.5251742 | 23.2027025 | 4710439.60 | 680918.85 | 1144.41 | 1098.999 | 0.03 | 0.01 |
| C12 | 42.5251736 | 23.2026883 | 4710439.50 | 680917.69 | 1144.44 | 1099.028 | 0.02 | 0.01 |
| C13 | 42.5251833 | 23.2026542 | 4710440.51 | 680914.85 | 1144.50 | 1099.091 | 0.06 | 0.01 |
| C14 | 42.5251883 | 23.2026303 | 4710441.02 | 680912.88 | 1144.50 | 1099.093 | 0.06 | 0.01 |
| C15 | 42.5251931 | 23.2026075 | 4710441.49 | 680910.99 | 1144.53 | 1099.123 | 0.06 | 0.01 |
| C16 | 42.5251972 | 23.2025817 | 4710441.90 | 680908.86 | 1144.43 | 1099.018 | 0.06 | 0.01 |
| C17 | 42.5252018 | 23.2025572 | 4710442.37 | 680906.84 | 1144.73 | 1099.322 | 0.03 | 0.03 |
| C18 | 42.5252083 | 23.2025314 | 4710443.03 | 680904.70 | 1145.15 | 1099.742 | 0.06 | 0.02 |
| C19 | 42.5252092 | 23.2025086 | 4710443.07 | 680902.82 | 1145.18 | 1099.77 | 0.06 | 0.02 |
| C20 | 42.5252144 | 23.2024839 | 4710443.60 | 680900.78 | 1145.57 | 1100.166 | 0.06 | 0.02 |
| C21 | 42.5252189 | 23.2024594 | 4710444.04 | 680898.76 | 1145.50 | 1100.089 | 0.06 | 0.02 |
| C22 | 42.5252194 | 23.2024358 | 4710444.06 | 680896.82 | 1145.49 | 1100.084 | 0.06 | 0.02 |
| C23 | 42.5252231 | 23.2024150 | 4710444.41 | 680895.09 | 1145.56 | 1100.152 | 0.06 | 0.02 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | H _{EVRS} , [m] | ms, [m] | mh, [m] |
|-----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| D2 | 42.5251058 | 23.2029025 | 4710432.44 | 680935.48 | 1144.23 | 1098.825 | 0.06 | 0.01 |
| D3 | 42.5251100 | 23.2028756 | 4710432.84 | 680933.25 | 1144.20 | 1098.797 | 0.06 | 0.01 |
| D4 | 42.5251106 | 23.2028472 | 4710432.84 | 680930.92 | 1143.35 | 1097.945 | 0.06 | 0.01 |
| D5 | 42.5251139 | 23.2028289 | 4710433.17 | 680929.41 | 1143.41 | 1097.998 | 0.06 | 0.02 |
| D6 | 42.5251200 | 23.2028053 | 4710433.80 | 680927.45 | 1143.37 | 1097.966 | 0.06 | 0.02 |
| D7 | 42.5251239 | 23.2027817 | 4710434.18 | 680925.50 | 1142.89 | 1097.479 | 0.06 | 0.02 |
| D8 | 42.5251275 | 23.2027572 | 4710434.53 | 680923.48 | 1142.11 | 1096.707 | 0.06 | 0.02 |
| D9 | 42.5251308 | 23.2027325 | 4710434.85 | 680921.44 | 1141.66 | 1096.255 | 0.06 | 0.02 |
| D10 | 42.5251367 | 23.2027097 | 4710435.45 | 680919.55 | 1141.24 | 1095.83 | 0.06 | 0.02 |
| D11 | 42.5251428 | 23.2026858 | 4710436.08 | 680917.57 | 1141.05 | 1095.646 | 0.06 | 0.02 |
| D12 | 42.5251497 | 23.2026611 | 4710436.79 | 680915.52 | 1141.16 | 1095.757 | 0.06 | 0.02 |
| D13 | 42.5251531 | 23.2026378 | 4710437.11 | 680913.60 | 1141.43 | 1096.022 | 0.06 | 0.02 |
| D14 | 42.5251611 | 23.2026161 | 4710437.96 | 680911.79 | 1142.03 | 1096.623 | 0.06 | 0.02 |
| D15 | 42.5251661 | 23.2025922 | 4710438.47 | 680909.82 | 1142.44 | 1097.033 | 0.06 | 0.02 |
| D16 | 42.5251692 | 23.2025694 | 4710438.76 | 680907.94 | 1142.71 | 1097.303 | 0.06 | 0.02 |
| D17 | 42.5251717 | 23.2025469 | 4710438.99 | 680906.08 | 1142.87 | 1097.466 | 0.06 | 0.02 |
| D18 | 42.5251761 | 23.2025214 | 4710439.43 | 680903.97 | 1143.29 | 1097.883 | 0.06 | 0.02 |
| D19 | 42.5251808 | 23.2024964 | 4710439.90 | 680901.90 | 1143.49 | 1098.078 | 0.06 | 0.02 |
| D20 | 42.5251847 | 23.2024725 | 4710440.28 | 680899.93 | 1143.98 | 1098.577 | 0.06 | 0.02 |
| D21 | 42.5251883 | 23.2024478 | 4710440.63 | 680897.89 | 1144.18 | 1098.773 | 0.06 | 0.02 |
| D22 | 42.5251933 | 23.2024217 | 4710441.13 | 680895.73 | 1144.51 | 1099.1 | 0.06 | 0.02 |
| D23 | 42.5251969 | 23.2023986 | 4710441.48 | 680893.82 | 1144.66 | 1099.249 | 0.06 | 0.03 |
| E2 | 42.5250928 | 23.2028978 | 4710430.98 | 680935.13 | 1143.59 | 1098.185 | 0.03 | 0.01 |
| E3 | 42.5250931 | 23.2028750 | 4710430.96 | 680933.25 | 1142.89 | 1097.478 | 0.06 | 0.01 |
| E4 | 42.5250967 | 23.2028525 | 4710431.31 | 680931.40 | 1142.57 | 1097.159 | 0.06 | 0.01 |
| E5 | 42.5251028 | 23.2028250 | 4710431.93 | 680929.12 | 1142.57 | 1097.164 | 0.06 | 0.02 |
| E6 | 42.5251056 | 23.2028006 | 4710432.19 | 680927.10 | 1142.22 | 1096.81 | 0.06 | 0.02 |
| E7 | 42.5251111 | 23.2027750 | 4710432.75 | 680924.99 | 1142.19 | 1096.785 | 0.04 | 0.01 |
| E8 | 42.5251147 | 23.2027511 | 4710433.10 | 680923.02 | 1141.62 | 1096.209 | 0.06 | 0.02 |
| E9 | 42.5251194 | 23.2027281 | 4710433.57 | 680921.11 | 1141.08 | 1095.674 | 0.06 | 0.02 |
| E10 | 42.5251222 | 23.2027069 | 4710433.84 | 680919.37 | 1140.42 | 1095.009 | 0.06 | 0.02 |
| E11 | 42.5251267 | 23.2026769 | 4710434.27 | 680916.89 | 1139.87 | 1094.462 | 0.06 | 0.02 |
| E12 | 42.5251306 | 23.2026517 | 4710434.65 | 680914.80 | 1140.10 | 1094.691 | 0.06 | 0.02 |
| E13 | 42.5251331 | 23.2026275 | 4710434.87 | 680912.81 | 1139.41 | 1093.999 | 0.06 | 0.02 |
| E14 | 42.5251367 | 23.2026033 | 4710435.22 | 680910.81 | 1139.59 | 1094.178 | 0.06 | 0.02 |
| E15 | 42.5251403 | 23.2025775 | 4710435.57 | 680908.68 | 1139.70 | 1094.288 | 0.06 | 0.02 |
| E16 | 42.5251436 | 23.2025528 | 4710435.88 | 680906.64 | 1141.07 | 1095.667 | 0.06 | 0.02 |
| E17 | 42.5251450 | 23.2025322 | 4710435.99 | 680904.95 | 1141.26 | 1095.856 | 0.06 | 0.02 |
| E18 | 42.5251508 | 23.2024961 | 4710436.57 | 680901.97 | 1141.81 | 1096.404 | 0.06 | 0.02 |
| E19 | 42.5251542 | 23.2024786 | 4710436.90 | 680900.52 | 1142.22 | 1096.812 | 0.06 | 0.02 |
| E20 | 42.5251594 | 23.2024533 | 4710437.43 | 680898.43 | 1142.83 | 1097.425 | 0.06 | 0.02 |
| E21 | 42.5251619 | 23.2024281 | 4710437.65 | 680896.34 | 1143.29 | 1097.887 | 0.06 | 0.02 |
| E22 | 42.5251631 | 23.2024047 | 4710437.73 | 680894.42 | 1143.06 | 1097.653 | 0.06 | 0.03 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | H _{EVRS} , [m] | ms, [m] | mh, [m] |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| E23 | 42.5251675 | 23.2023797 | 4710438.17 | 680892.36 | 1142.97 | 1097.56 | 0.02 | 0.04 |
| F1 | 42.5251678 | 23.2029444 | 4710439.40 | 680938.74 | 1149.31 | 1103.903 | 0.06 | 0.01 |
| F2 | 42.5251703 | 23.2029214 | 4710439.63 | 680936.84 | 1148.86 | 1103.456 | 0.06 | 0.01 |
| F3 | 42.5251747 | 23.2028969 | 4710440.07 | 680934.82 | 1148.56 | 1103.153 | 0.06 | 0.01 |
| F4 | 42.5251783 | 23.2028733 | 4710440.42 | 680932.87 | 1148.01 | 1102.599 | 0.06 | 0.01 |
| F5 | 42.5251853 | 23.2028503 | 4710441.15 | 680930.96 | 1148.09 | 1102.681 | 0.06 | 0.01 |
| F6 | 42.5251903 | 23.2028269 | 4710441.65 | 680929.03 | 1148.15 | 1102.747 | 0.06 | 0.02 |
| F7 | 42.5251950 | 23.2028033 | 4710442.13 | 680927.07 | 1147.79 | 1102.38 | 0.06 | 0.02 |
| F8 | 42.5251989 | 23.2027800 | 4710442.51 | 680925.14 | 1147.43 | 1102.019 | 0.06 | 0.02 |
| F9 | 42.5252025 | 23.2027556 | 4710442.86 | 680923.13 | 1147.16 | 1101.751 | 0.06 | 0.02 |
| F10 | 42.5252067 | 23.2027303 | 4710443.27 | 680921.04 | 1146.93 | 1101.524 | 0.06 | 0.02 |
| F11 | 42.5252100 | 23.2027050 | 4710443.58 | 680918.95 | 1146.67 | 1101.267 | 0.06 | 0.02 |
| F12 | 42.5252158 | 23.2026814 | 4710444.18 | 680917.00 | 1146.68 | 1101.277 | 0.06 | 0.01 |
| F13 | 42.5252217 | 23.2026581 | 4710444.78 | 680915.06 | 1146.59 | 1101.182 | 0.06 | 0.01 |
| F14 | 42.5252275 | 23.2026350 | 4710445.38 | 680913.15 | 1147.11 | 1101.703 | 0.06 | 0.01 |
| F15 | 42.5252306 | 23.2026103 | 4710445.66 | 680911.11 | 1146.94 | 1101.532 | 0.06 | 0.01 |
| F16 | 42.5252369 | 23.2025875 | 4710446.32 | 680909.22 | 1147.15 | 1101.742 | 0.06 | 0.01 |
| F17 | 42.5252389 | 23.2025622 | 4710446.48 | 680907.14 | 1146.99 | 1101.58 | 0.06 | 0.01 |
| F18 | 42.5252439 | 23.2025361 | 4710446.98 | 680904.98 | 1147.10 | 1101.693 | 0.06 | 0.02 |
| F19 | 42.5252483 | 23.2025103 | 4710447.42 | 680902.85 | 1147.21 | 1101.806 | 0.06 | 0.02 |
| F20 | 42.5252533 | 23.2024861 | 4710447.93 | 680900.85 | 1147.31 | 1101.901 | 0.06 | 0.02 |
| F21 | 42.5252569 | 23.2024619 | 4710448.28 | 680898.85 | 1147.32 | 1101.913 | 0.06 | 0.02 |
| F22 | 42.5252642 | 23.2024375 | 4710449.03 | 680896.82 | 1147.24 | 1101.829 | 0.06 | 0.02 |
| G1 | 42.5251858 | 23.2029492 | 4710441.42 | 680939.08 | 1150.40 | 1104.989 | 0.06 | 0.01 |
| G2 | 42.5251897 | 23.2029250 | 4710441.80 | 680937.08 | 1149.93 | 1104.525 | 0.06 | 0.01 |
| G3 | 42.5251936 | 23.2029017 | 4710442.18 | 680935.15 | 1149.54 | 1104.135 | 0.06 | 0.01 |
| G4 | 42.5251972 | 23.2028772 | 4710442.53 | 680933.14 | 1149.28 | 1103.872 | 0.04 | 0.01 |
| G5 | 42.5252017 | 23.2028528 | 4710442.97 | 680931.11 | 1149.01 | 1103.604 | 0.06 | 0.01 |
| G6 | 42.5252047 | 23.2028292 | 4710443.26 | 680929.17 | 1148.94 | 1103.535 | 0.06 | 0.02 |
| G7 | 42.5252081 | 23.2028056 | 4710443.58 | 680927.22 | 1148.57 | 1103.165 | 0.06 | 0.02 |
| G8 | 42.5252108 | 23.2027814 | 4710443.84 | 680925.22 | 1148.37 | 1102.965 | 0.06 | 0.02 |
| G10 | 42.5252181 | 23.2027347 | 4710444.54 | 680921.37 | 1147.56 | 1102.154 | 0.06 | 0.01 |
| G11 | 42.5252222 | 23.2027100 | 4710444.95 | 680919.33 | 1147.43 | 1102.018 | 0.06 | 0.01 |
| G12 | 42.5252256 | 23.2026853 | 4710445.27 | 680917.29 | 1147.23 | 1101.819 | 0.06 | 0.01 |
| G13 | 42.5252308 | 23.2026625 | 4710445.80 | 680915.40 | 1147.14 | 1101.731 | 0.06 | 0.01 |
| G14 | 42.5252372 | 23.2026378 | 4710446.46 | 680913.35 | 1147.93 | 1102.527 | 0.06 | 0.01 |
| G15 | 42.5252419 | 23.2026119 | 4710446.93 | 680911.22 | 1147.68 | 1102.27 | 0.06 | 0.01 |
| G16 | 42.5252464 | 23.2025881 | 4710447.37 | 680909.24 | 1147.50 | 1102.097 | 0.06 | 0.01 |
| G17 | 42.5252508 | 23.2025642 | 4710447.82 | 680907.27 | 1147.49 | 1102.085 | 0.06 | 0.01 |
| G18 | 42.5252550 | 23.2025397 | 4710448.23 | 680905.25 | 1147.62 | 1102.213 | 0.06 | 0.01 |
| G19 | 42.5252600 | 23.2025164 | 4710448.73 | 680903.32 | 1147.72 | 1102.309 | 0.06 | 0.02 |
| G20 | 42.5252633 | 23.2024928 | 4710449.05 | 680901.37 | 1147.85 | 1102.446 | 0.06 | 0.02 |
| G21 | 42.5252678 | 23.2024686 | 4710449.49 | 680899.37 | 1147.81 | 1102.398 | 0.06 | 0.02 |

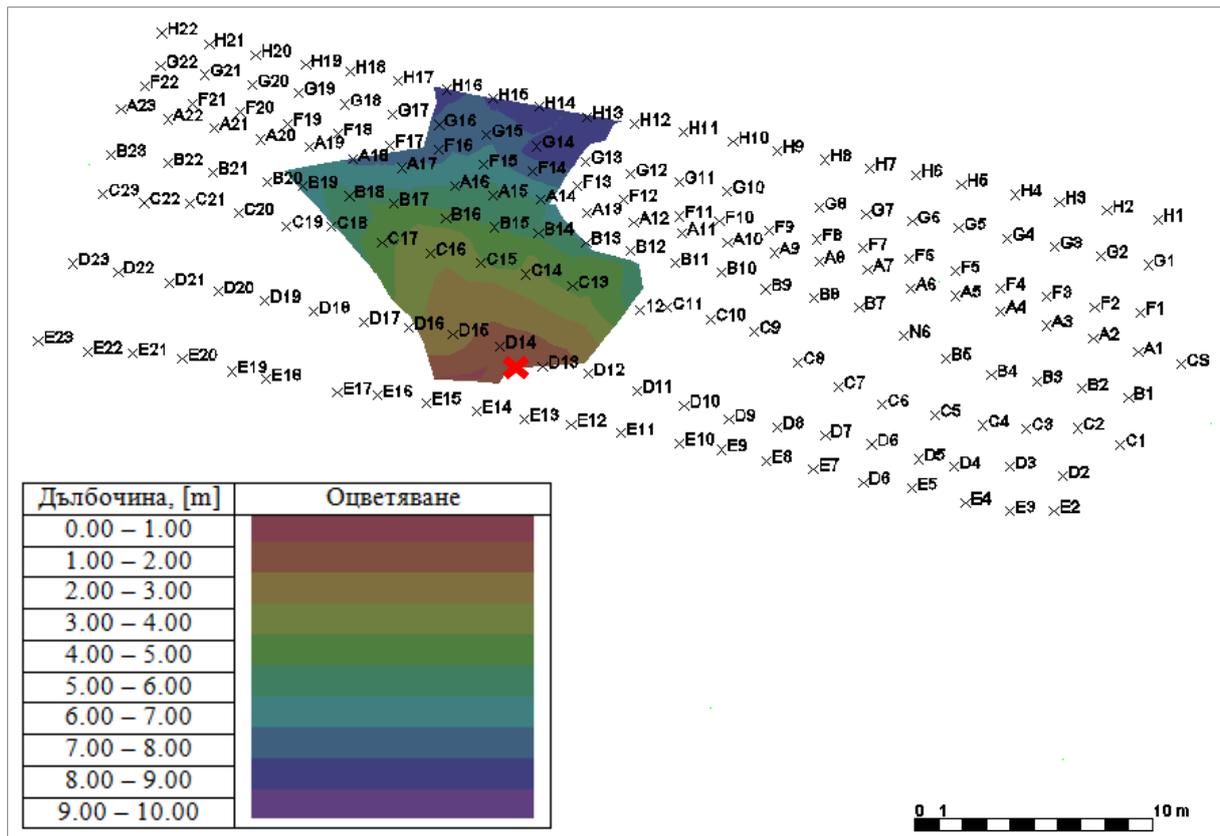
7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| № | B _{WGS84} , [°] | L _{WGS84} , [°] | N _{UTM34N} , [m] | E _{UTM34N} , [m] | H _{WGS84} , [m] | H _{EVRS} , [m] | ms, [m] | mh, [m] |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| G22 | 42.5252717 | 23.2024461 | 4710449.88 | 680897.51 | 1147.63 | 1102.227 | 0.06 | 0.02 |
| H1 | 42.5252031 | 23.2029547 | 4710443.34 | 680939.48 | 1151.68 | 1106.272 | 0.01 | 0.02 |
| H2 | 42.5252069 | 23.2029289 | 4710443.72 | 680937.35 | 1151.05 | 1105.643 | 0.06 | 0.01 |
| H3 | 42.5252108 | 23.2029047 | 4710444.10 | 680935.35 | 1151.02 | 1105.609 | 0.06 | 0.01 |
| H4 | 42.5252139 | 23.2028822 | 4710444.39 | 680933.50 | 1150.39 | 1104.987 | 0.06 | 0.01 |
| H5 | 42.5252183 | 23.2028547 | 4710444.83 | 680931.23 | 1150.00 | 1104.588 | 0.01 | 0.02 |
| H6 | 42.5252225 | 23.2028317 | 4710445.24 | 680929.32 | 1149.86 | 1104.457 | 0.06 | 0.02 |
| H7 | 42.5252256 | 23.2028081 | 4710445.53 | 680927.37 | 1149.51 | 1104.099 | 0.03 | 0.01 |
| H8 | 42.5252292 | 23.2027853 | 4710445.88 | 680925.49 | 1149.28 | 1103.873 | 0.06 | 0.02 |
| H9 | 42.5252331 | 23.2027608 | 4710446.26 | 680923.47 | 1148.84 | 1103.434 | 0.06 | 0.02 |
| H10 | 42.5252369 | 23.2027383 | 4710446.64 | 680921.61 | 1148.53 | 1103.124 | 0.06 | 0.02 |
| H11 | 42.5252411 | 23.2027128 | 4710447.05 | 680919.50 | 1148.38 | 1102.969 | 0.06 | 0.03 |
| H12 | 42.5252447 | 23.2026881 | 4710447.40 | 680917.46 | 1148.17 | 1102.76 | 0.06 | 0.03 |
| H13 | 42.5252478 | 23.2026639 | 4710447.69 | 680915.47 | 1148.11 | 1102.707 | 0.01 | 0.00 |
| H14 | 42.5252522 | 23.2026394 | 4710448.13 | 680913.45 | 1148.32 | 1102.909 | 0.06 | 0.01 |
| H15 | 42.5252558 | 23.2026158 | 4710448.48 | 680911.50 | 1148.42 | 1103.009 | 0.06 | 0.01 |
| H16 | 42.5252597 | 23.2025922 | 4710448.86 | 680909.55 | 1148.23 | 1102.821 | 0.06 | 0.01 |
| H17 | 42.5252633 | 23.2025675 | 4710449.21 | 680907.50 | 1148.27 | 1102.862 | 0.06 | 0.01 |
| H18 | 42.5252678 | 23.2025431 | 4710449.65 | 680905.48 | 1148.14 | 1102.733 | 0.06 | 0.01 |
| H19 | 42.5252706 | 23.2025206 | 4710449.91 | 680903.63 | 1148.74 | 1103.331 | 0.06 | 0.02 |
| H20 | 42.5252747 | 23.2024950 | 4710450.32 | 680901.52 | 1148.39 | 1102.98 | 0.06 | 0.02 |
| H21 | 42.5252794 | 23.2024714 | 4710450.79 | 680899.56 | 1148.34 | 1102.931 | 0.06 | 0.02 |
| H22 | 42.5252842 | 23.2024472 | 4710451.27 | 680897.56 | 1148.15 | 1102.74 | 0.02 | 0.02 |

7.1.5. Дълбочина на пещерата

От плановете и височинни координати на гравиметричните станции на повърхността и тримерния модел на пещерата е определена нейната дълбочина като разлика между котите на повърхността и нейния таван. За целта в среда на AutoCAD Civil 3D са образувани разликите между двете повърхнини. Резултатите са показани с хипсометрично оцветяване на Фигура 16. Дълбочина на тавана на пещерата под повърхността на гравиметричната мрежа. С черен цвят са отбелязани гравиметричните станции, където ясно се вижда постепенното увеличаване на дебелината на скалния слой от юг на север.

Минималната дълбочина на тавана под повърхността на гравиметричната мрежа е 0.80 m, максималната – 9.02 m, а средната - 4.86 m. Обемът на скалната маса е 511.01 m³.



Фигура 16. Дълбочина на тавана на пещерата под повърхността на гравиметричната мрежа. С черен цвят са отбелязани гравиметричните станции, с червен „X“ - входът

7.2. ОБРАБОТКА НА ГРАВИМЕТРИЧНИТЕ ДАННИ

Обработката на гравиметричните данни е извършена с помощта на интерактивната софтуерна среда и език за програмиране от високо ниво MATLAB. Системата предлага отлични възможности за решаване на сложни научни и инженерни проблеми, визуализация и анализ на данни, благодарение на богатството си от интегрирани алгоритми, подпомагащи създаването и развитието на свои собствени.

За целите на изследването са използвани както част от вградените функции, така и нови, създадени съобразно описания в точка 3 технологичен ред. В това число влизат функции за изчисляване дрейфа на гравиметъра според проведените изследвания, изравнение на гравиметричната мрежа по МНМК, изчисление на аномалиите „Буге“, филтрация на резултатите, визуализация на данните и други спомагателни.

7.2.1. Изследване на дрейфа на гравиметъра

Извършените през половин час отчети са превърнати в милигали, след което са нанесени приливни корекции и за всяка група е изчислен по един осреднен отчет. На Фигура 17. *Изследване на дрейфа на гравиметъра по дни: а) 20.7.2014 г.; б) 26.7.2014 г.; в) 3.9.2014 г.; г) 13.9.2014 г.; д) 14.9.2014 г.; е) 22.6.2015 г.* По абсциса са часовете на отчетите, а по ордината са техните стойности резултатите от тази обработка са онагледени графично. За всеки отделен ден е ясно видимо изменението на нулата на инструмента, резултат от което са различните стойности на отчетите с течение на времето. При съпоставка на графиките от всички дни се забелязва сходство помежду им, а именно възможността всички те да бъдат описани посредством синусоидална крива. Това обаче изключва възможността за определяне на една конкретна стойност, с която да бъдат коригирани същинските измервания.

От друга страна, тези криви могат да бъдат разделени на участъци, в които изменението на дрейфа да се апроксимира с права. За да се докаже, че такава апроксимация би могла да се приложи и при обработката на същинските гравиметрични измервания, са образувани разликите между резултатите от изследването за период, съответстващ на този на максималния гравиметричен рейс, и стойностите на апроксимиращата ги права. Критерий за приложимостта на допускането е разликата да не надвишава два пъти точността на гравиметъра.

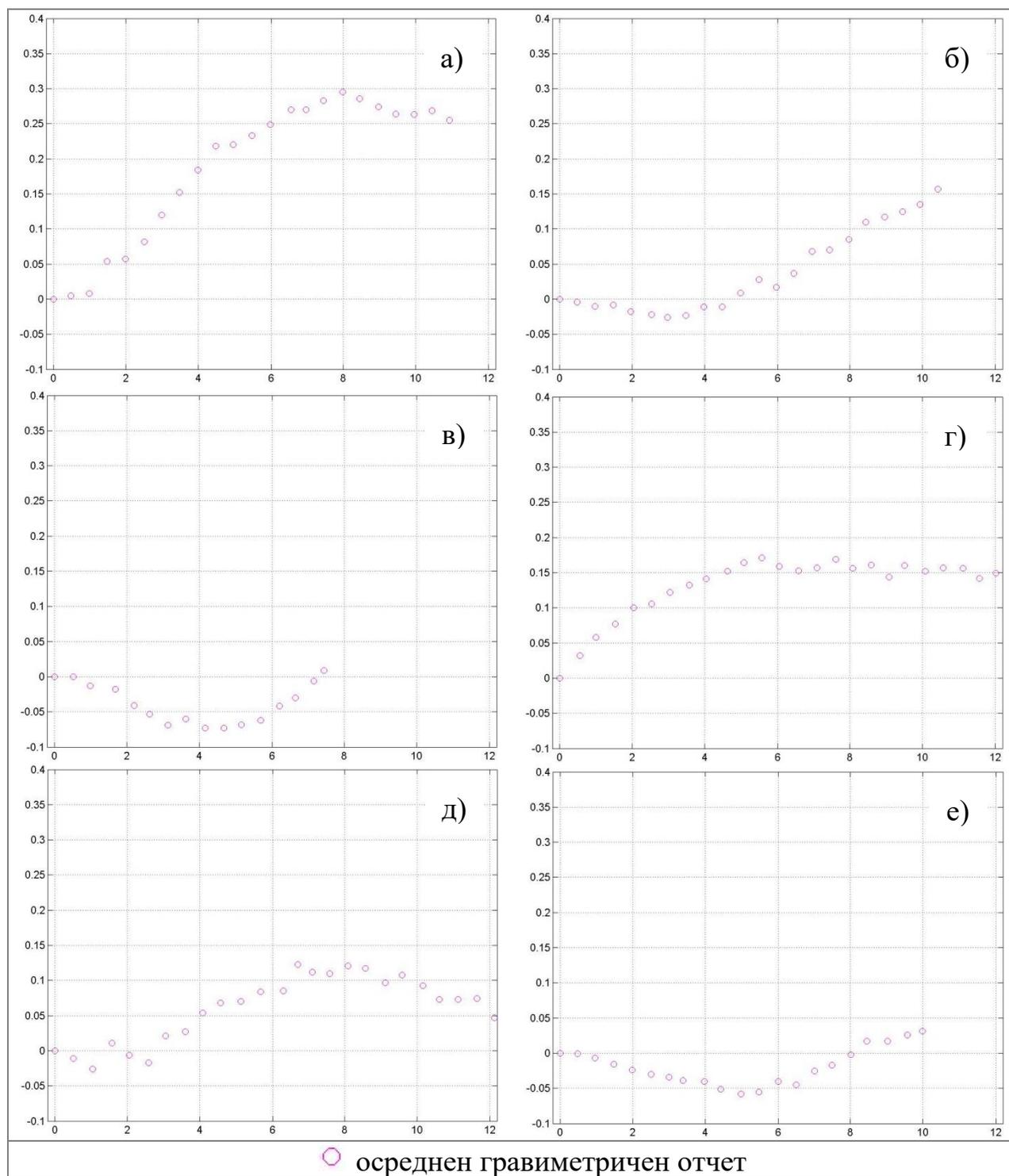
Максималното време за затваряне на рейс в базовата точка CS на обекта е 7:07 часа, а за базовата точка BF в селото – 10:32 часа; съответните минимални стойности са – 2:42 часа и 4:48 часа. В Таблица е представена обработка на отчетените при изследването стойности, спрямо които участъци за период 7:07 часа (maxCS) и 10:32 часа (maxBF) са апроксимирани с права.

За всеки ден са изчислени набор от скорости поради синусоидалния характер на изменение на дрейфа, като броят скорости е обусловен от продължителността на периода на апроксимация. Така, например, на 20.7.2014 изследването е с продължителност от около 10:56 часа, което обхваща 4 различни участъка от синусоидалната крива с продължителност 7:07 часа, но само един цял участък с продължителност 10:32 часа. Изчислените скорости са в диапазона $V_{\max BF} = [0.006; 0.028] \text{ mGal/h}$ и $V_{\max CS} = [-0.005; 0.043] \text{ mGal/h}$.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Изчислени са разликите между реално отчетената и изчислена стойност във всеки един момент. Те варират в диапазона $dV_{\max BF} = [0.035; 0.058]$ mGal и $dV_{\max CS} = [0.011; 0.051]$ mGal. Лесно обясними са по-малките отклонения при апроксимацията с права за по-късия период, но и в двата случая максималните разлики са съпоставими с точността на гравиметъра, което утвърждава допускането за линейна скорост на дрейфа за период с продължителност на максималния рейс и по-малък.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



Фигура 17. Изследване на дрейфа на гравиметъра по дни: а) 20.7.2014 г.; б) 26.7.2014 г.; в) 3.9.2014 г.; г) 13.9.2014 г.; д) 14.9.2014 г.; е) 22.6.2015 г. По абсциса са часовете на отчетите, а по ордината са техните стойности в милигали

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Таблица 7. Изследване на дрейфа на гравиметъра. С V е означена скоростта, а с dV - отклонението на изчислена стойност спрямо отчетената в съответния момент. С maxBF=10:32 часа и maxCS=7:07 часа е означена максималната продължителност на гравиметричен рейс, започнат и приключен съответно в точка BF и в точка CS

| | V_maxBF, [mGal/h] | dv_maxBF, [mGal] | V_maxCS, [mGal/h] | dv_maxCS, [mGal] |
|-----------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 20.7.2014 | 0.028 | 0.058 | 0.043 | 0.036 |
| | - | - | 0.042 | 0.039 |
| | - | - | 0.039 | 0.042 |
| | - | - | 0.034 | 0.041 |
| | - | - | 0.029 | 0.038 |
| | - | - | 0.023 | 0.034 |
| | - | - | 0.018 | 0.032 |
| | - | - | 0.012 | 0.037 |
| 26.7.2014 | - | - | 0.010 | 0.031 |
| | - | - | 0.013 | 0.033 |
| | - | - | 0.016 | 0.033 |
| | - | - | 0.019 | 0.038 |
| | - | - | 0.022 | 0.030 |
| | - | - | 0.024 | 0.022 |
| 3.9.2014 | - | - | -0.005 | 0.051 |
| 13.9.2014 | 0.012 | 0.040 | 0.020 | 0.020 |
| | 0.009 | 0.038 | 0.016 | 0.024 |
| | 0.006 | 0.035 | 0.012 | 0.025 |
| | - | - | 0.009 | 0.027 |
| | - | - | 0.007 | 0.026 |
| | - | - | 0.004 | 0.024 |
| | - | - | 0.003 | 0.021 |
| | - | - | 0.001 | 0.018 |
| | - | - | -0.001 | 0.014 |
| - | - | -0.002 | 0.011 | |
| 14.9.2014 | 0.013 | 0.045 | 0.020 | 0.031 |
| | 0.012 | 0.050 | 0.021 | 0.022 |
| | 0.011 | 0.052 | 0.021 | 0.025 |
| | 0.008 | 0.054 | 0.018 | 0.031 |
| | - | - | 0.017 | 0.035 |
| | - | - | 0.014 | 0.039 |
| | - | - | 0.009 | 0.039 |
| | - | - | 0.005 | 0.038 |
| | - | - | 0.002 | 0.033 |
| - | - | -0.002 | 0.029 | |
| 22.6.2014 | - | - | -0.005 | 0.031 |
| | - | - | -0.002 | 0.036 |
| | - | - | 0.002 | 0.040 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| | V_maxBF, [mGal/h] | dv_maxBF, [mGal] | V_maxCS, [mGal/h] | dv_maxCS, [mGal] |
|--|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | - | - | 0.005 | 0.029 |
| | - | - | 0.008 | 0.030 |
| | - | - | 0.010 | 0.029 |

7.2.2. Обработка на гравиметричната мрежа

Гравиметричната мрежа е обработена според предложението технологичен ред. Извършеното изследване на гравиметричния дрейф е включено в обосновката на избрания изравнителен модел за определяне на силата на тежестта, а от тук и изчисляване на аномалиите на силата на тежестта.

7.2.2.1. Изчисляване на силата на тежестта

Проведени са няколко различни изравнения на мрежата:

- МНМК1 - обикновено изравнение по МНМК, при което неизвестни (180 бр.) са стойностите на силата на тежестта във всяка една от станциите;
- МНМК2 – в изравнението са включени три допълнителни неизвестни (180+3 бр.), съответстващи на скоростите на дрейфа на инструмента за измерванията през юли 2014 г., септември 2014 г. и юни 2015 г.;
- МНМК3 – в изравнението са включени допълнителни девет неизвестни (180+9 бр.) за скоростите на дрейфа, в съответствие с дните на провеждане на измерванията.

При МНМК1 като изходни стойности на измерените величини са използвани разлики, върху които са нанесени предварително всички необходими корекции, посочени в точка 3.3.1., и изравнение е реализирано по схемата от точка 3.3.2.1. При МНМК2 и МНМК3, където скоростите на дрейфа участват като неизвестни, върху изходните стойности на измерените величини са нанесени всички корекции освен тези за дрейфа, а изравнението е реализирано по схемата от точка 3.3.2.2. Измерванията са привързани към гравиметричната станция в АГКК, чиято абсолютна стойност на силата на тежестта е $G_{AGKK} = 980240.660$ mGal в Световната гравиметрична система IGSN-71 (Милев, 2013). Обработени са като равноточни.

В резултат средните квадратни грешки на неизвестните и изравнените стойности на силата на тежестта в трите случая не се различават съществено

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

– до няколко хилядни от милигала. Това може да се обясни с организацията на измерванията, която включва повторения в малък брой точки.

Извършени са неколkokратни последователни изравнения – първоначално с всички измервания, след което постепенно са изключени част от тях. Една част са именно повторните измервания на точки, което може да се обясни с нестабилната земна основа. Същевременно резултатите от изравнението потвърждават удачния избор на CS като базова станция.

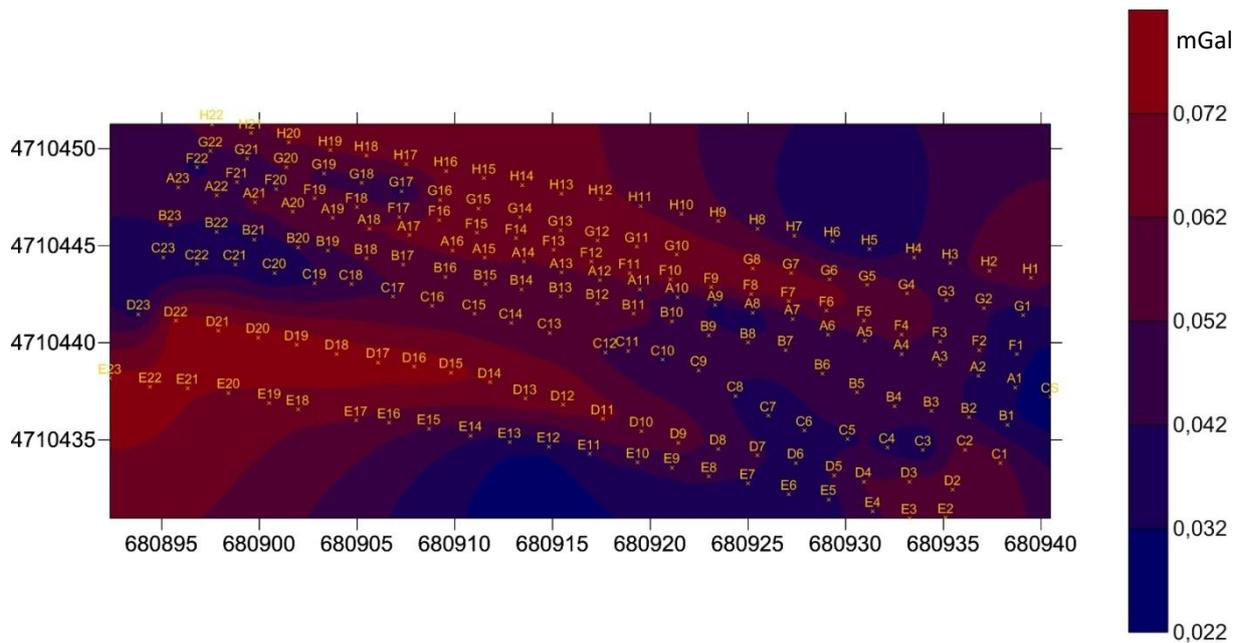
В Таблица са представени резултатите от МНМК1 и МНМК3. Средните квадратни грешки в първия случай не надвишават по абсолютна стойност неизвестните нараствания (x), което лишава от смисъл изравнението по тази схема.

Като основа за по-нататъшните изчисления е избран вариантът МНМК3. Изборът му е обоснован с резултатите от проведеното изследване на дрейфа, според което в различните дни и часове стойностите на дрейфа са различни, като същевременно продължителността на дневните наблюдения позволява допускането за изменение на дрейфа по линеен закон.

При МНМК3 стойностите на неизвестните нараствания на силата на тежестта в станциите са значително по-големи или съпоставими със съответните им средни квадратни грешки. Максималната средна квадратна грешка е 0.079 mGal в т. D19. Получените скорости са по-малки от съответните им средни квадратни грешки. От друга страна обаче стойностите им са съпоставими с получените резултати от проведените изследвания на гравиметъра.

На Фигура 18 са представени средните квадратни грешки на силата на тежестта при МНМК3. Добре изразена е зависимостта от схемата на проведените измервания – станциите в начало и края на гравиметричните рейсове са с ниски стойности, а с отдалечаване от тях – нарастват. При продължителните гравиметрични рейсове средните квадратни грешки достигат най-високи стойности. При изравнение на мрежата като свободна, средните квадратни грешки биха се понижали, като стойността им бъде редуцирана с тази на базовата станция CS.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



Фигура 18. Средни квадратни грешки на силата на тежестта при МНМК3

Таблица 8. Резултати от МНМК1 и МНМК3. С „x“ са означени неизвестните нараствания на силата на тежестта, с „mx“ съответните средните квадратни грешки, а с „G“ - силата на тежестта в точките. В долната част на таблицата са стойностите на скоростта на дрейфа „U“

| Неизвестно | x_MNМК1, [mGal] | mx_MNМК1, [mGal] | G_MNМК1, [mGal] | x_МНМК3, [mGal] | mx_МНМК3, [mGal] | G_МНМК3, [mGal] |
|------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| BF | -0.004 | 0.020 | 980166.070 | -0.001 | 0.020 | 980166.072 |
| CS | -0.037 | 0.022 | 980132.525 | -0.074 | 0.022 | 980132.519 |
| A1 | -0.034 | 0.035 | 980132.626 | -0.072 | 0.034 | 980132.622 |
| A2 | -0.032 | 0.042 | 980132.669 | -0.066 | 0.041 | 980132.671 |
| A3 | -0.029 | 0.046 | 980132.713 | -0.063 | 0.045 | 980132.719 |
| A4 | -0.027 | 0.048 | 980132.750 | -0.060 | 0.046 | 980132.759 |
| A5 | -0.025 | 0.048 | 980132.980 | -0.058 | 0.046 | 980132.993 |
| A6 | -0.023 | 0.045 | 980132.727 | -0.055 | 0.045 | 980132.744 |
| A7 | -0.021 | 0.041 | 980132.782 | -0.051 | 0.041 | 980132.804 |
| A8 | -0.020 | 0.034 | 980132.908 | -0.045 | 0.035 | 980132.936 |
| A9 | 0.057 | 0.036 | 980132.889 | -0.116 | 0.035 | 980132.883 |
| A10 | 0.051 | 0.044 | 980132.864 | -0.593 | 0.043 | 980132.857 |
| A11 | 0.044 | 0.051 | 980132.928 | -0.357 | 0.049 | 980132.921 |
| A12 | 0.040 | 0.055 | 980132.928 | 0.771 | 0.054 | 980132.921 |
| A13 | 0.033 | 0.059 | 980132.994 | 0.508 | 0.057 | 980132.985 |
| A14 | 0.027 | 0.062 | 980132.970 | -0.033 | 0.060 | 980132.961 |
| A15 | 0.022 | 0.063 | 980133.017 | -0.015 | 0.062 | 980133.006 |
| A16 | 0.016 | 0.064 | 980132.980 | -0.016 | 0.063 | 980132.969 |
| A17 | 0.010 | 0.065 | 980132.982 | -0.297 | 0.063 | 980132.970 |
| A18 | 0.003 | 0.064 | 980132.982 | -0.327 | 0.063 | 980132.969 |
| A19 | -0.003 | 0.063 | 980132.976 | -0.276 | 0.062 | 980132.962 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| Неизвестно | x_MNМК1, [mGal] | mx_MNМК1, [mGal] | G_MNМК1, [mGal] | x_MНМК3, [mGal] | mx_MНМК3, [mGal] | G_MНМК3, [mGal] |
|------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| A20 | -0.008 | 0.062 | 980132.977 | -0.291 | 0.061 | 980132.962 |
| A21 | -0.011 | 0.059 | 980132.933 | -0.298 | 0.058 | 980132.921 |
| A22 | -0.017 | 0.055 | 980132.952 | -0.416 | 0.055 | 980132.938 |
| A23 | -0.024 | 0.051 | 980133.014 | -0.429 | 0.050 | 980132.999 |
| B1 | 0.003 | 0.035 | 980132.583 | -0.875 | 0.035 | 980132.573 |
| B2 | -0.002 | 0.043 | 980132.755 | -0.734 | 0.042 | 980132.748 |
| B3 | -0.006 | 0.048 | 980132.780 | -1.417 | 0.047 | 980132.775 |
| B4 | -0.009 | 0.051 | 980132.897 | 0.248 | 0.049 | 980132.892 |
| B5 | -0.012 | 0.052 | 980132.927 | 0.072 | 0.051 | 980132.923 |
| B6 | -0.014 | 0.052 | 980133.055 | 0.444 | 0.051 | 980133.050 |
| B7 | -0.016 | 0.050 | 980133.014 | 0.223 | 0.049 | 980133.008 |
| B8 | -0.018 | 0.047 | 980132.937 | 0.115 | 0.046 | 980132.931 |
| B9 | -0.028 | 0.050 | 980133.064 | 0.121 | 0.049 | 980133.058 |
| B10 | -0.018 | 0.055 | 980133.143 | 0.164 | 0.054 | 980133.137 |
| B11 | -0.008 | 0.058 | 980133.141 | 0.031 | 0.057 | 980133.136 |
| B12 | 0.001 | 0.060 | 980133.199 | 0.124 | 0.059 | 980133.194 |
| B13 | 0.010 | 0.061 | 980133.154 | -0.052 | 0.060 | 980133.149 |
| B14 | 0.018 | 0.062 | 980133.180 | 0.532 | 0.060 | 980133.176 |
| B15 | 0.002 | 0.061 | 980133.160 | 0.343 | 0.060 | 980133.151 |
| B16 | 0.011 | 0.060 | 980133.324 | 0.296 | 0.059 | 980133.316 |
| B17 | 0.021 | 0.058 | 980133.238 | 0.050 | 0.056 | 980133.230 |
| B18 | 0.029 | 0.055 | 980133.219 | -0.065 | 0.053 | 980133.212 |
| B19 | 0.039 | 0.050 | 980133.300 | -0.069 | 0.049 | 980133.293 |
| B20 | 0.049 | 0.044 | 980133.116 | -0.267 | 0.043 | 980133.109 |
| B21 | 0.058 | 0.036 | 980133.116 | -0.228 | 0.035 | 980133.111 |
| B22 | -0.024 | 0.036 | 980133.091 | -0.083 | 0.035 | 980133.084 |
| B23 | -0.019 | 0.044 | 980133.281 | -0.010 | 0.043 | 980133.274 |
| C1 | 0.065 | 0.057 | 980132.720 | -0.569 | 0.056 | 980132.711 |
| C2 | 0.054 | 0.059 | 980132.875 | -0.519 | 0.058 | 980132.866 |
| C3 | -0.021 | 0.034 | 980132.940 | -0.411 | 0.034 | 980132.933 |
| C4 | -0.021 | 0.040 | 980133.102 | -0.344 | 0.039 | 980133.095 |
| C5 | -0.021 | 0.041 | 980133.200 | -0.359 | 0.040 | 980133.194 |
| C6 | -0.021 | 0.039 | 980133.287 | -0.360 | 0.039 | 980133.280 |
| C7 | -0.021 | 0.034 | 980133.304 | -0.105 | 0.033 | 980133.296 |
| C8 | -0.018 | 0.042 | 980133.272 | -0.152 | 0.041 | 980133.264 |
| C9 | -0.038 | 0.045 | 980133.300 | -0.197 | 0.044 | 980133.294 |
| C10 | -0.037 | 0.041 | 980133.276 | -0.310 | 0.040 | 980133.270 |
| C11 | -0.041 | 0.047 | 980133.287 | -0.269 | 0.046 | 980133.281 |
| C12 | -0.046 | 0.052 | 980133.312 | -0.312 | 0.050 | 980133.307 |
| C13 | -0.050 | 0.054 | 980133.268 | -0.439 | 0.053 | 980133.262 |
| C14 | -0.055 | 0.056 | 980133.226 | 0.695 | 0.054 | 980133.222 |
| C15 | -0.059 | 0.056 | 980133.226 | 0.585 | 0.054 | 980133.220 |
| C16 | -0.064 | 0.055 | 980133.299 | 0.593 | 0.053 | 980133.293 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| Неизвестно | x_MNМК1, [mGal] | mx_MNМК1, [mGal] | G_MNМК1, [mGal] | x_MНМК3, [mGal] | mx_MНМК3, [mGal] | G_MНМК3, [mGal] |
|------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| C17 | -0.067 | 0.052 | 980133.299 | 0.421 | 0.051 | 980133.292 |
| C18 | -0.072 | 0.048 | 980133.278 | 0.575 | 0.047 | 980133.272 |
| C19 | -0.077 | 0.042 | 980133.314 | 0.444 | 0.041 | 980133.307 |
| C20 | -0.080 | 0.033 | 980133.190 | 0.278 | 0.033 | 980133.183 |
| C21 | -0.075 | 0.038 | 980133.195 | 0.185 | 0.037 | 980133.189 |
| C22 | -0.070 | 0.037 | 980133.272 | 0.338 | 0.036 | 980133.266 |
| C23 | -0.062 | 0.033 | 980133.272 | 1.097 | 0.032 | 980133.266 |
| D2 | 0.042 | 0.059 | 980133.225 | 0.961 | 0.059 | 980133.213 |
| D3 | 0.011 | 0.056 | 980133.316 | 1.020 | 0.056 | 980133.304 |
| D4 | 0.000 | 0.053 | 980133.303 | 0.842 | 0.054 | 980133.292 |
| D5 | -0.021 | 0.042 | 980133.390 | 0.945 | 0.044 | 980133.379 |
| D6 | -0.032 | 0.033 | 980133.339 | 0.843 | 0.037 | 980133.329 |
| D7 | -0.014 | 0.043 | 980133.433 | 0.919 | 0.045 | 980133.423 |
| D8 | -0.015 | 0.050 | 980133.545 | 0.999 | 0.051 | 980133.535 |
| D9 | -0.016 | 0.056 | 980133.630 | 1.307 | 0.057 | 980133.620 |
| D10 | -0.018 | 0.061 | 980133.708 | 1.433 | 0.061 | 980133.699 |
| D11 | -0.019 | 0.065 | 980133.717 | 1.242 | 0.065 | 980133.708 |
| D12 | -0.019 | 0.069 | 980133.653 | 1.447 | 0.068 | 980133.644 |
| D13 | -0.020 | 0.072 | 980133.629 | 1.314 | 0.071 | 980133.621 |
| D14 | -0.020 | 0.074 | 980133.498 | 1.187 | 0.073 | 980133.488 |
| D15 | -0.021 | 0.076 | 980133.493 | 1.035 | 0.075 | 980133.484 |
| D16 | -0.023 | 0.079 | 980133.491 | 0.649 | 0.077 | 980133.483 |
| D17 | -0.022 | 0.078 | 980133.551 | 0.637 | 0.076 | 980133.543 |
| D18 | -0.023 | 0.080 | 980134.044 | 1.122 | 0.078 | 980134.035 |
| D19 | -0.024 | 0.080 | 980134.044 | 1.049 | 0.079 | 980134.035 |
| D20 | -0.025 | 0.080 | 980133.966 | 0.946 | 0.079 | 980133.958 |
| D21 | -0.026 | 0.080 | 980133.973 | 0.954 | 0.078 | 980133.965 |
| D22 | -0.027 | 0.079 | 980133.945 | 0.856 | 0.077 | 980133.937 |
| D23 | -0.113 | 0.039 | 980133.412 | 0.154 | 0.038 | 980133.406 |
| E2 | 0.031 | 0.059 | 980133.327 | -0.054 | 0.059 | 980133.317 |
| E3 | 0.022 | 0.058 | 980133.442 | 0.191 | 0.058 | 980133.431 |
| E4 | -0.011 | 0.048 | 980133.429 | 0.307 | 0.050 | 980133.418 |
| E5 | -0.033 | 0.036 | 980133.488 | 0.380 | 0.037 | 980133.479 |
| E6 | -0.032 | 0.032 | 980133.580 | 0.401 | 0.032 | 980133.572 |
| E7 | -0.045 | 0.040 | 980133.604 | 0.152 | 0.039 | 980133.598 |
| E8 | -0.041 | 0.044 | 980133.663 | 0.243 | 0.043 | 980133.656 |
| E9 | -0.040 | 0.046 | 980133.732 | 0.306 | 0.045 | 980133.726 |
| E10 | -0.041 | 0.045 | 980133.814 | 0.305 | 0.044 | 980133.807 |
| E11 | -0.043 | 0.041 | 980133.948 | 0.444 | 0.040 | 980133.942 |
| E12 | -0.048 | 0.035 | 980133.941 | 0.394 | 0.034 | 980133.935 |
| E13 | -0.037 | 0.036 | 980134.160 | 0.727 | 0.035 | 980134.153 |
| E14 | -0.037 | 0.045 | 980134.219 | 0.782 | 0.044 | 980134.213 |
| E15 | -0.036 | 0.052 | 980134.648 | 1.135 | 0.051 | 980134.642 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| Неизвестно | x_MNМК1, [mGal] | mx_MNМК1, [mGal] | G_MNМК1, [mGal] | x_MНМК3, [mGal] | mx_MНМК3, [mGal] | G_MНМК3, [mGal] |
|------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| E16 | -0.035 | 0.058 | 980134.372 | 0.860 | 0.056 | 980134.366 |
| E17 | -0.034 | 0.062 | 980134.377 | 0.650 | 0.061 | 980134.371 |
| E18 | -0.033 | 0.066 | 980134.362 | 0.623 | 0.065 | 980134.356 |
| E19 | -0.032 | 0.070 | 980134.252 | 0.574 | 0.068 | 980134.245 |
| E20 | -0.032 | 0.072 | 980134.126 | 0.471 | 0.070 | 980134.120 |
| E21 | -0.031 | 0.075 | 980134.097 | 0.571 | 0.073 | 980134.090 |
| E22 | -0.030 | 0.077 | 980134.147 | 0.622 | 0.075 | 980134.140 |
| E23 | -0.028 | 0.078 | 980134.150 | 0.622 | 0.076 | 980134.142 |
| F1 | 0.042 | 0.036 | 980132.519 | -1.068 | 0.035 | 980132.510 |
| F2 | 0.040 | 0.045 | 980132.620 | -1.465 | 0.044 | 980132.610 |
| F3 | 0.037 | 0.051 | 980132.678 | -1.409 | 0.050 | 980132.669 |
| F4 | 0.036 | 0.057 | 980132.842 | -1.170 | 0.055 | 980132.833 |
| F5 | 0.034 | 0.061 | 980132.660 | -1.361 | 0.059 | 980132.651 |
| F6 | 0.032 | 0.064 | 980132.819 | -1.176 | 0.063 | 980132.809 |
| F7 | 0.028 | 0.067 | 980132.855 | -0.761 | 0.065 | 980132.845 |
| F8 | 0.026 | 0.069 | 980132.946 | -0.856 | 0.067 | 980132.937 |
| F9 | 0.023 | 0.071 | 980132.863 | -1.085 | 0.069 | 980132.854 |
| F10 | 0.020 | 0.072 | 980132.961 | -0.990 | 0.070 | 980132.953 |
| F11 | 0.017 | 0.072 | 980132.996 | -1.237 | 0.070 | 980132.988 |
| F12 | 0.017 | 0.072 | 980132.989 | -1.303 | 0.070 | 980132.980 |
| F13 | 0.014 | 0.072 | 980133.097 | -1.620 | 0.070 | 980133.089 |
| F14 | 0.011 | 0.071 | 980132.977 | -1.462 | 0.069 | 980132.969 |
| F15 | 0.013 | 0.069 | 980133.022 | -1.422 | 0.067 | 980133.012 |
| F16 | 0.009 | 0.067 | 980132.986 | -1.440 | 0.065 | 980132.977 |
| F17 | 0.006 | 0.064 | 980133.098 | -1.215 | 0.063 | 980133.089 |
| F18 | 0.003 | 0.061 | 980132.991 | -1.192 | 0.059 | 980132.984 |
| F19 | 0.000 | 0.057 | 980133.030 | -1.122 | 0.055 | 980133.023 |
| F20 | -0.004 | 0.051 | 980132.990 | -1.209 | 0.050 | 980132.983 |
| F21 | -0.008 | 0.045 | 980133.026 | -0.011 | 0.044 | 980133.021 |
| F22 | -0.011 | 0.036 | 980133.032 | -0.047 | 0.035 | 980133.027 |
| G1 | 0.117 | 0.036 | 980132.278 | -0.803 | 0.035 | 980132.272 |
| G2 | 0.112 | 0.045 | 980132.350 | -0.845 | 0.043 | 980132.345 |
| G3 | 0.114 | 0.051 | 980132.371 | -0.713 | 0.050 | 980132.364 |
| G4 | 0.113 | 0.056 | 980132.526 | -0.609 | 0.055 | 980132.520 |
| G5 | 0.111 | 0.061 | 980132.498 | -0.608 | 0.059 | 980132.492 |
| G6 | 0.108 | 0.064 | 980132.538 | -0.686 | 0.062 | 980132.533 |
| G7 | 0.104 | 0.067 | 980132.545 | -0.579 | 0.065 | 980132.541 |
| G8 | 0.101 | 0.068 | 980132.565 | -0.603 | 0.067 | 980132.562 |
| G10 | 0.111 | 0.070 | 980132.858 | -0.279 | 0.068 | 980132.853 |
| G11 | 0.106 | 0.071 | 980132.814 | -0.366 | 0.069 | 980132.810 |
| G12 | 0.103 | 0.071 | 980132.807 | -0.386 | 0.069 | 980132.803 |
| G13 | 0.105 | 0.070 | 980132.798 | -0.045 | 0.068 | 980132.795 |
| G14 | 0.106 | 0.068 | 980132.699 | -0.112 | 0.067 | 980132.695 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

| Неизвестно | x_MNМК1, [mGal] | mx_MNМК1, [mGal] | G_MNМК1, [mGal] | x_MНМК3, [mGal] | mx_MНМК3, [mGal] | G_MНМК3, [mGal] |
|------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| G15 | 0.107 | 0.067 | 980132.878 | 0.063 | 0.065 | 980132.874 |
| G16 | 0.102 | 0.064 | 980132.860 | 0.032 | 0.062 | 980132.857 |
| G17 | 0.107 | 0.036 | 980132.958 | 0.214 | 0.035 | 980132.951 |
| G18 | 0.097 | 0.044 | 980132.927 | -0.008 | 0.043 | 980132.919 |
| G19 | 0.086 | 0.050 | 980132.897 | -0.030 | 0.049 | 980132.890 |
| G20 | 0.076 | 0.054 | 980132.832 | -0.023 | 0.053 | 980132.824 |
| G21 | 0.047 | 0.036 | 980132.825 | 0.000 | 0.047 | 980132.824 |
| G22 | 0.050 | 0.044 | 980132.830 | 0.025 | 0.052 | 980132.829 |
| H1 | 0.102 | 0.061 | 980132.078 | -0.672 | 0.059 | 980132.075 |
| H2 | 0.100 | 0.056 | 980132.230 | -0.477 | 0.055 | 980132.227 |
| H3 | 0.098 | 0.051 | 980132.172 | -0.539 | 0.050 | 980132.170 |
| H4 | 0.099 | 0.045 | 980132.361 | -0.098 | 0.044 | 980132.358 |
| H5 | 0.094 | 0.036 | 980132.362 | -0.115 | 0.035 | 980132.359 |
| H6 | 0.116 | 0.036 | 980132.343 | -0.199 | 0.035 | 980132.336 |
| H7 | 0.111 | 0.044 | 980132.450 | -0.230 | 0.043 | 980132.445 |
| H8 | 0.107 | 0.051 | 980132.443 | -0.087 | 0.050 | 980132.438 |
| H9 | 0.100 | 0.056 | 980132.588 | 0.060 | 0.054 | 980132.584 |
| H10 | 0.098 | 0.059 | 980132.595 | 0.036 | 0.058 | 980132.591 |
| H11 | 0.093 | 0.062 | 980132.611 | 0.026 | 0.061 | 980132.607 |
| H12 | 0.088 | 0.064 | 980132.671 | 0.034 | 0.063 | 980132.667 |
| H13 | 0.103 | 0.071 | 980132.660 | 0.147 | 0.069 | 980132.656 |
| H14 | 0.085 | 0.066 | 980132.659 | 0.126 | 0.065 | 980132.656 |
| H15 | 0.081 | 0.066 | 980132.657 | 0.048 | 0.066 | 980132.654 |
| H16 | 0.080 | 0.066 | 980132.687 | -0.286 | 0.067 | 980132.684 |
| H17 | 0.074 | 0.066 | 980132.712 | -0.316 | 0.066 | 980132.708 |
| H18 | 0.070 | 0.064 | 980132.763 | -0.245 | 0.065 | 980132.759 |
| H19 | 0.065 | 0.062 | 980132.637 | -0.380 | 0.064 | 980132.633 |
| H20 | 0.063 | 0.059 | 980132.657 | -0.655 | 0.062 | 980132.653 |
| H21 | 0.059 | 0.056 | 980132.731 | -0.544 | 0.060 | 980132.728 |
| H22 | 0.055 | 0.051 | 980132.768 | -0.745 | 0.056 | 980132.765 |
| Неизвестно | X_MNМК1, [mGal] | mx_MNМК1, [mGal] | U_MNМК1, [mGal/h] | x_MНМК3, [mGal] | mx_MНМК3, [mGal] | U_MНМК3, [mGal/h] |
| U1 | - | - | - | 0.023 | 0.010 | 0.023 |
| U2 | - | - | - | -0.030 | 0.016 | -0.030 |
| U3 | - | - | - | -0.010 | 0.011 | -0.010 |
| U4 | - | - | - | -0.004 | 0.012 | -0.004 |
| U5 | - | - | - | 0.015 | 0.017 | 0.015 |
| U6 | - | - | - | 0.011 | 0.017 | 0.011 |
| U7 | - | - | - | 0.005 | 0.025 | 0.005 |
| U8 | - | - | - | 0.011 | 0.019 | 0.011 |
| U9 | - | - | - | -0.005 | 0.025 | -0.005 |

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

7.2.2.2. Изчисляване на аномалиите на силата на тежестта

С така определените стойности на силата на тежестта са изчислени аномалиите „Буге“. Плътноста на въздуха е приета за равна на 0 g / cm^3 , а тази на скалата - 2.60 g / cm^3 .

Специфичен момент от тяхната обработка е въвеждането на поправките заради релефа. Съобразно размера на изследвания обект са подготвени и използвани данни за релефа от следните източници:

- Заснетите гравиметрични станции;
- Топографски карти в мащаб 1:5 000 – извършено е оцифряване за район с размер 2 x 2 km;
- SRTM⁷ модел с резолюция 1 x 1”.

С подготвените данни е генериран регулярен цифров модел⁸ на релефа със стъпка 50 x 50 m. Направено е сравнение между котите от ГНСС измерванията и модела, представено в Таблица , според което създаденият модел се съчетава добре с реалния терен.

Таблица 9. Статистически данни за цифровия модел на релефа - разлики с измерените ГНСС точки

| Разлика, [m] | Брой точки | % |
|--------------|------------|-------|
| 0.00 - 1.00 | 117 | 65.36 |
| 1.01 - 2.00 | 50 | 27.93 |
| 2.01 - 3.00 | 11 | 6.15 |
| 3.01 - 4.00 | 1 | 0.56 |
| 4.01 - 5.00 | 0 | 0 |
| 5.01 - 6.00 | 0 | 0 |
| 6.01 - 7.00 | 0 | 0 |
| 7.01 - 8.00 | 0 | 0 |
| 8.01 - 9.00 | 0 | 0 |
| 9.01 - 10.00 | 0 | 0 |
| >10.00 | 0 | 0 |
| Общо: | 179 | 100 |

⁶ По геоложки данни.

⁷ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) – цифров модел на релефа, получен от спътниково заснемане.

⁸ Генерирането на цифровия регулярен модел на терена и последващото изчисляване на топографския ефект са извършени от проф. Мирослав Старчевич.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Цифровият модел на релефа обхваща територия с размер 12 000 x 13 000 m. Съставящата го мрежа включва 241 възела по източно направление и 261 възела по северното.

Посредством модела е изчислен топографският ефект във всяка точка за няколко интервала на отдалеченост при плътност $\rho_0 = 2.00 \text{ g/cm}^3$. Корекциите за релефа при плътност $\rho = 2.60 \text{ g/cm}^3$ се изчисляват посредством връзката:

$$\delta g_p = \delta g_p^0 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (37),$$

където δg_p^0 е стойността на корекцията за плътност ρ_0 .

От Таблица ясно се вижда по-големият диапазон на вариациите за разстояние до 1 km, както и че за районът, заключен между окръжностите с радиуси 1 и 20 km вариацията на топографския ефект значително по-малък. По тази причина съобразно размерите на обекта, не се налага изчисляването на топографския ефект за по-голям район.

Таблица 10. Стойност на топографския ефект при плътност 2.60 g/cm^3 в зависимост от разстоянието

| Радиус, [km] | Минимален ефект, [mGal] | Максимален ефект, [mGal] |
|--------------|-------------------------|--------------------------|
| 0 – 1 | 1.40 | 1.76 |
| 1 – 20 | 1.83 | 1.87 |
| 0 – 20 | 3.28 | 3.58 |

За изчисляването на корекциите на релефа върху първоначално генерираният модел на терена е приложена сплайн интерполация за създаване на клетки с размер 5 x 5 m за радиус до 200 m, за района между 200 m и 1 km е приложена мрежата с клетки 50 x 50 m, а за района между 1 km и 20 km са използвани клетки с размер 1 x 1 km. Действието води до незначително изменение на топографския ефект.

7.3. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Визуализацията на аномалиите „Буге“ във вид на карти дава много добра представа за тяхното разпределение и качествата на предложените методи за филтрация. Същевременно прегледът по профили предоставя един различен и също така полезен поглед върху тях. За локализиране на

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

пещерата от интерес представляват ориентираните напречно на нея, надлъжни профили на мрежата.

7.3.1. Карти на аномалията „Буге“

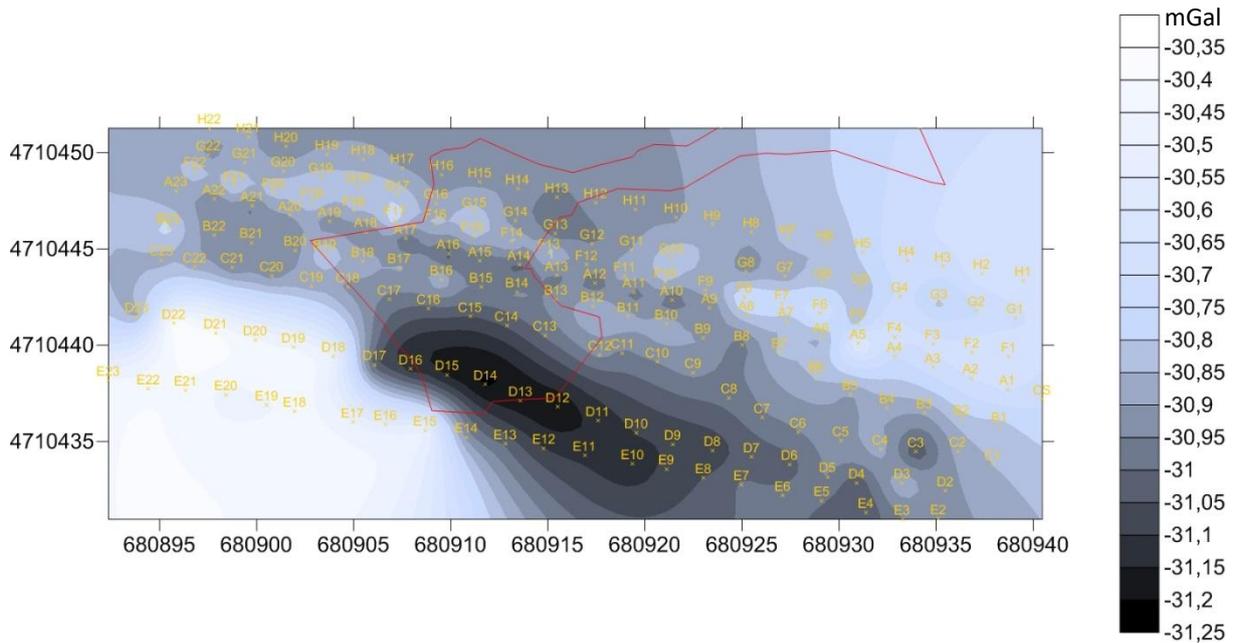
На Фигура 19 получените стойности за аномалията „Буге“ са визуализирани посредством софтуера Surfer 11 с интерполация по метода „Кригинг“.

На графиката ясно се вижда значителна отрицателна аномалия, чиято минимална стойност е в точка D14, при входа на пещерата. Извън очертанията на пещерата стойностите на аномалията „Буге“ се повишават, както и с увеличаване дълбочината на пещерата от юг на север.

Посочените тенденции обаче се нарушават от някои резки промени по профили и в отделни станции, които са в противоречие с природата на плавно изменение на полето в съответствие с постепенното отдалечаване на станциите от източника на аномалии. Рязката променливост на стойностите се наблюдава основно между надлъжните профили. При съпоставка със схемата на гравиметричните измервания (Фигура 19) местата на „скокове“ видимо съвпадат с проведените рейсове.

Прави впечатление резкият преход при точките D16-D18 и E13-E15. Всички те са измерени в рейса, проведен през юни 2015 г., повече от половин година след извършената нивелация. Възможно е да са претърпели някакви изменения предвид близостта им до входа на Живата вода, като няколко от тях (D17, E12 и E18) дори са трасирани повторно. Тъй като тези точки са встрани от границите на пещерата, няма да бъдат изключени от по-нататъшната обработка.

Интересно, сравнително голямо по размери петно се забелязва в западната част на мрежата при точки A20-A22, B20-B22 и C20-C21. Аномалията е по-ниска спрямо тази в околните точки и е сходна със стойностите над пещерата в съседство. Силно впечатление предизвиква и очертанието на пещерата, което „сочи“ в тази посока. Това прави доста вероятно наличието на неизвестна досега кухня в непосредствена близост, чиято височина и дълбочина да са съпоставими тези на пещерната зала в съседство.



Фигура 19. Аномалия "Буге"

За заличаване на резките скокове в отделни станции и по дължините на гравиметричните рейсове, върху „суровите“ аномалии „Буге“ е извършена филтрация по предложените в точка 1.3.4.2. методи:

- Филтър „Ханинг“

За прилагането филтъра „Ханинг“ е използвана програма, предоставена от проф. Мирослав Старчевич. Като входни данни за програмата е генерирана регулярна мрежа на данните със стъпка 0.2 m - 10 пъти по-малка от средната гъстота на мрежата от около 2 m. Стъпка с този размер позволява по-голяма гъвкавост при варирането с основния параметър на филтрацията – размера на филтриращия прозорец, и същевременно не увеличава прекомерно обема данни.

Изпробвани са няколко варианта на филтриращи прозорци – с размер 5x5 възела, 11x11, 21 x 21, 31 x 31 и т.н. С увеличаване на размера настъпва видимо генерализиране, при което множеството малки петна постепенно изчезват от картината. Същевременно основната аномалия над пещерата се очертава все по-ясно. При прозорец с размер 31 x 31 и по-големи обаче резултатите се израждат, което обуславя зависимост от първоначално избраната стъпка на мрежата.

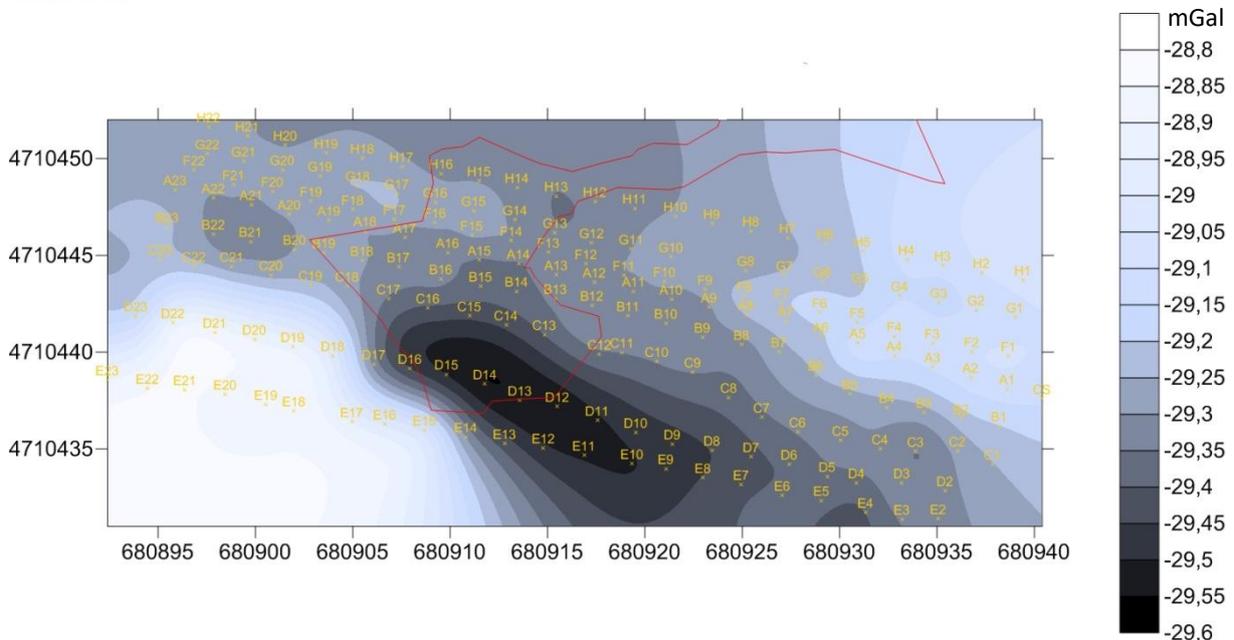
Получените са няколко карти на аномалията „Буге“, филтрирани по метода „Ханинг“. Сред тях вариантът 11x11 се откроява със няколко свои качества (Фигура 20). Видимият при суровата аномалия ход на рейсовете, в

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

новата карта категорично е заличен. В същото време откритите се при тях аномалии на пещерата и петното западно от нея затвърждават своето присъствие на картата. Забелязва се едно „изтичане“ на голямата аномалия при входа на пещерата от D12 към E10, което вероятно се дължи на необичайно голямата по стойност в близост до пещерата положителна аномалия в югозападната част на мрежата. Въпреки това отрицателната аномалията над пещерата се съчетава добре с направлението, профила и постепенно увеличаващата се дълбочина на пещерата. Минималната стойност на аномалията „Буге“ също се запазва рамките на пещерните очертания, при точка D14.

Прави впечатление „разсичането“ на аномалията при профили F и G. Вероятно то се дължи на остатъчен ефект от надлъжно проведените рейсове, в резултат на размера на филтриращия прозорец и характера на апроксимиращата функция, която вместо минимум в този участък бележи максимум.

Въпреки че относителният характер на аномалията „Буге“ се запазва добре при прилагането на филтрацията, интересна особеност е разликата от приблизително 1.5 mGal между сурови и филтрирани данни. Това би затруднило едно бъдещо привързване на данните с други гравиметрични снимки.



Фигура 20. Аномалия "Буге", филтрирана по метода „Ханинг“, прозорец 11 x 11 точки

- Полиномен филтър

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Изследвано е действието на филтъра при различни стойности на неговите параметри: степен на полинома, размер на прозорец и брой филтрации. За съпоставимост с филтъра „Ханинг“ е генерирана регулярна мрежа със стъпка 0.2 m, която обаче е ориентирана по основните направления на реалната мрежа, заради заложения алгоритъм на обработка по профили вместо площен прозорец. В изчислителния са използвани разстоянията между точките вместо техният брой, което позволява лесната му модификация за нерегулярни мрежи и профили.

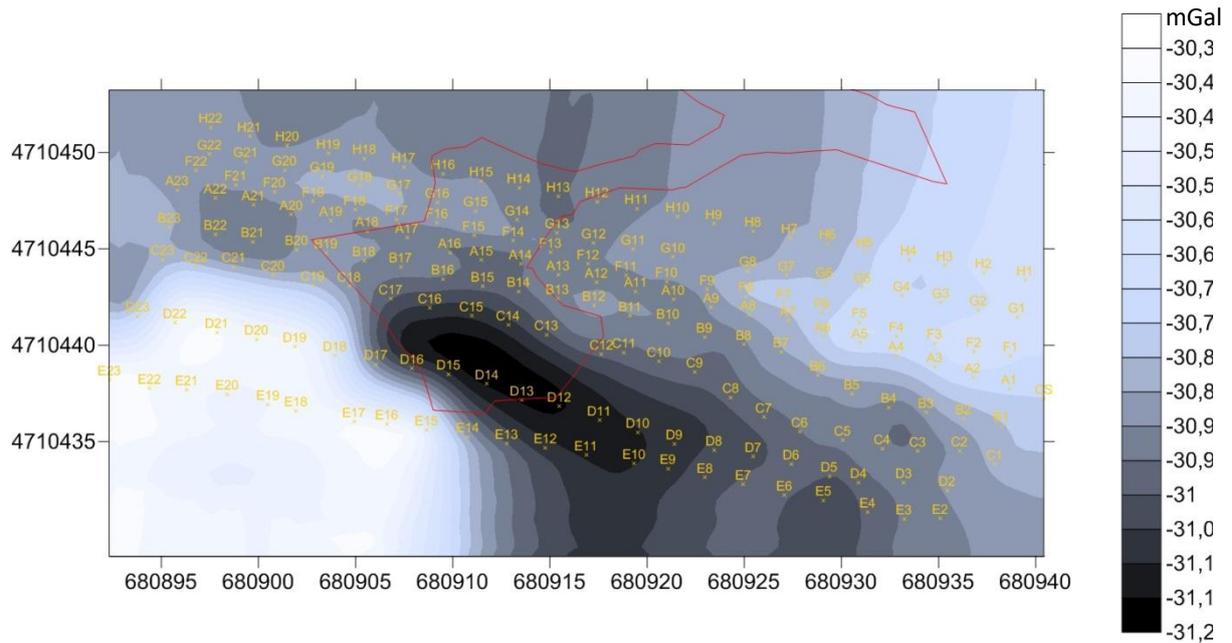
Особен интерес на филтрираща функция представлява полиномът от втора степен. Това е функцията, която най-добре описва наличието на аномална стойности и наподобява тази, заложена във филтъра „Ханинг“. На Фигура а) е разгледан случаят с еднократно приложен полином от втора степен с размер на прозореца 41 x 41 точки. Прозорец с такъв размер подхожда добре на средните размери на пещерата по двете основни направления - на надлъжните и напречните профили. Действително с прилагането на филтъра се подчертава добре аномалията, породена от пещерата в участъка между профилите F и E с обособяване на минимум на силата на тежестта в съчетание с отношението между височината и дълбочината на пещерата.

Наличието на петна в някои отделни станции се отстранява с неколkokратно прилагане на филтъра със същите параметри. Изчистената картина при трикратно приложен филтър затвърждава установените аномалии на Фигура 21 б). Минималната стойност на аномалията е в очертанията на пещерата, а разпространението ѝ е в добро съчетание с параметрите на кухнята.

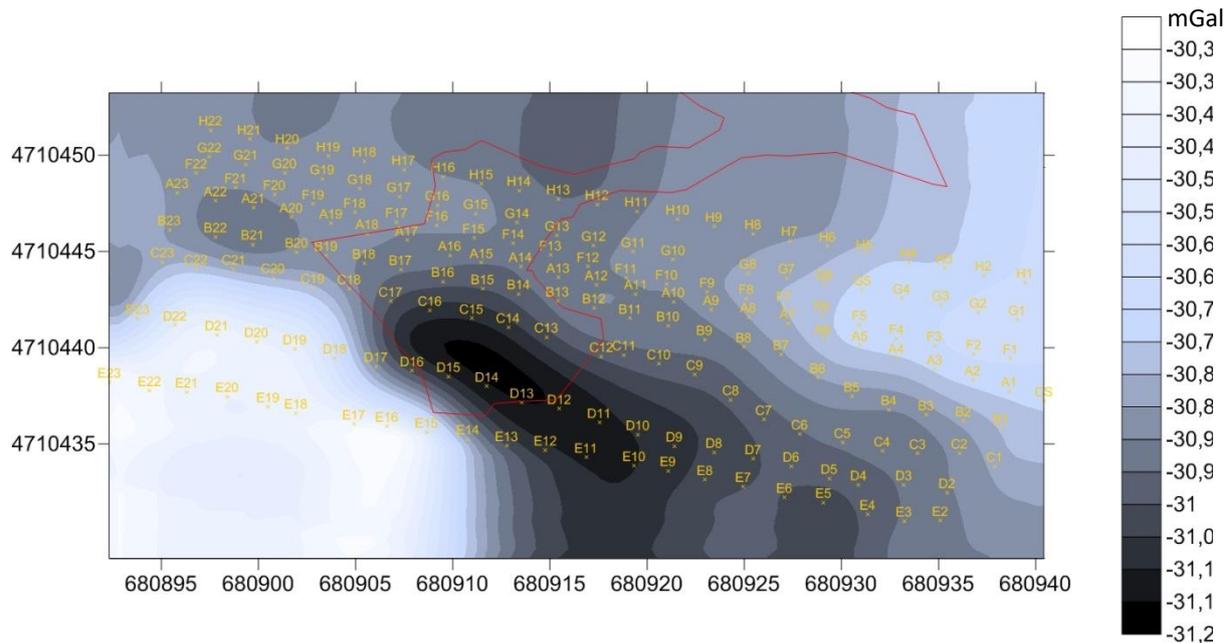
Направен е преглед на резултатите по надлъжни профили за суровата аномалия и филтрирани едно- и трикратно стойности. Двете филтрирани криви съвпадат до голяма степен. Съпоставката показва, че с трикратната филтрация, от една страна, са заличени допълнително следите от проведените рейсове, от друга, плавните изменения по надлъжното направление почти не са повлияни.

Характерната отрицателна аномалия в западната част на мрежата затвърждава своето присъствие и при полиномната филтрация. В югоизточната част на мрежата също утвърждава своето присъствие едно друго отрицателно петно. Макар и с малки размери, възможността за наличие на кухня в този участък е реална, тъй като в подножието на скалите в този участък има извор.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



а) еднократно приложена филтрация



б) трикратно приложена филтрация

Фигура 21. Филтрация на аномалиите "Буге" с полином от втора степен и размер на прозореца 41 x 41 точки

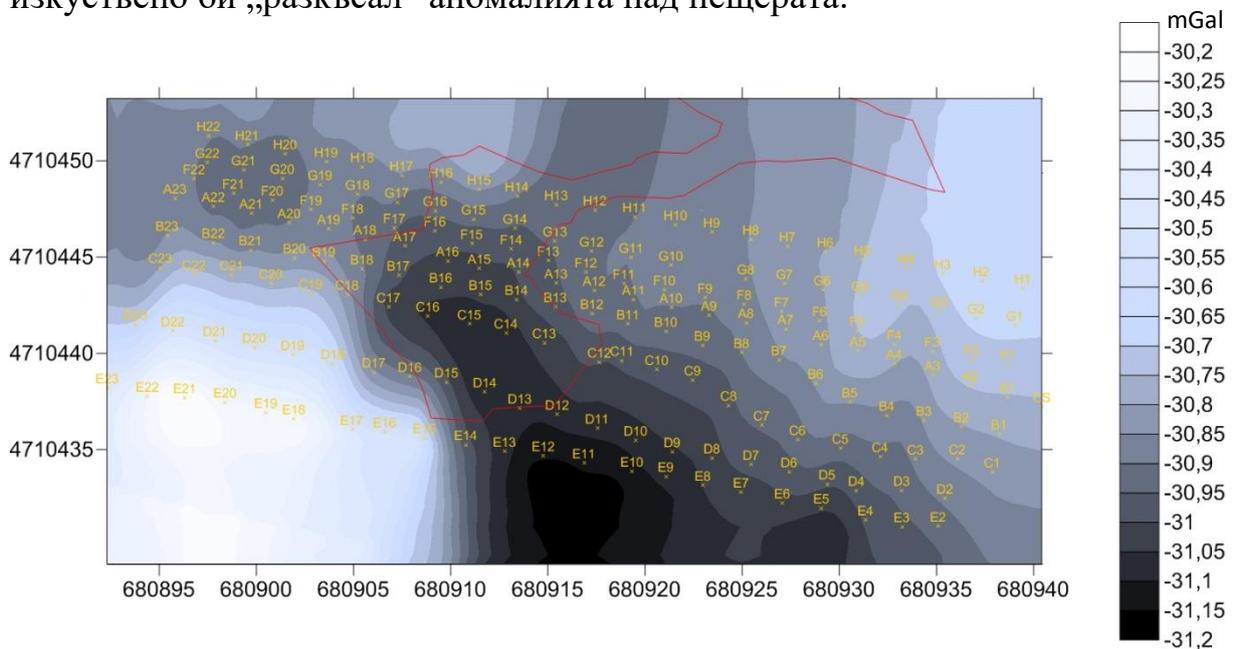
На Фигура 21 се проявява отново характерното разсичане при профилите F и G, забелязано при филтрацията „Ханинг“. Този ефект може

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

да се редуцира с филтриращ прозорец, чиито размер е съпоставим с този на обекта.

На Фигура 22 е представена филтрация с полином от втора степен, извършена само по напречни профили с прозорец, който със своите 71 точки обхваща пещерната зала по това направление. На графиката се вижда доста добро съчетание на аномалията с пещерата, както по отношение на нейната височина – максимална в централната част на залата и намаляваща към стените, така и постепенното ѝ отшумяване с увеличаване на дълбочината. Цялостният обем е много добре обособен, но картината е изгубила своята конкретност при входа на пещерата. Минималната стойност на аномалията е „изтекла“ на юг извън очертанията на пещерата, а характерното петно в западната част на мрежата се е изместило на север – и двете премествания са по направление на филтрираните напречни профили.

Прилагането на полиноми от трета и по-висока степен е обосновано в случаите, когато се предполага наличието на две или повече локални аномалии в рамките на филтриращия прозорец. За конкретната мрежа такъв филтър би могъл да намери приложение само по направление на надлъжните профили, но не и по напречното направление, тъй като изкуствено би „разкъсал“ аномалията над пещерата.



Фигура 22. Аномалия "Буге", филтрирана еднократно с полином от втора степен с прозорец 0 x 71 точки (само по напречни профили)

За разлика от полиномите от по-висока степен, чието прилагане е обосновано в прозорци с голям размер, полином от първа степен би могъл да се приложи в прозорец с достатъчно малък размер, който не предполага

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

в себе си наличието на минимум, в противен би могъл да „заглуши“ потенциалната аномалия.

Полиномите с различна от втора степен не са неприложими в общия случай, но за обхватът на конкретната мрежа най-подходящ е именно този вариант. Използването на прозорци с размери като тези на тялото и малко по-големи показват добри възможности за очертаване на общия му обем. Местата на потенциален достъп обаче, поради своята близост до повърхността и екстремни стойности, се съхраняват по-добре при филтрация с малки прозорци.

При неколккратно приложение на един филтър се постига затвърждаване на обособените аномалии, като се изчистват отделните петна по картината. Направен е преглед на разнообразни варианти на филтрация при различна степен на полинома, размери на прозорците и брой филтрации с цел обстойно проследяване на тяхното поведение.

7.3.2. Профили на аномалията „Буге“

По надлъжни профили от юг на север на Фигура 23 – 29 е представена графична съпоставка между суровата аномалия „Буге“ и филтрираните стойности по метода „Ханинг“ (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (трикратно приложен полином от 2-ра степен с прозорец 41 x 41). Данните са редуцирани спрямо средна за всяка от тях стойност.

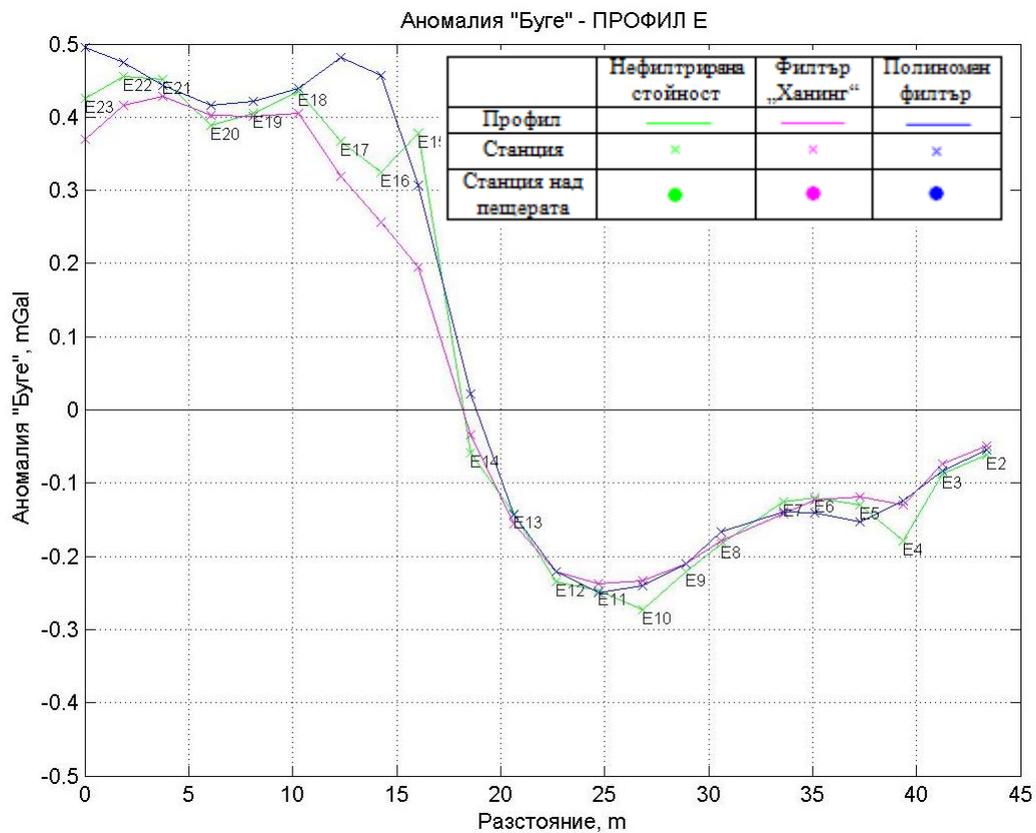
В участъците на плавно изменение двата филтъра показват значително сходство, следвайки очертаните от суровите данни тенденции, като същевременно изглаждат резките „скокове“ в отделните станции (например, Фигура 30). В участъците с поредица противоречиво редуващи се стойности се наблюдават известни отклонения между резултатите от двата филтъра - например, G11-G1 (Фигура 29).

Филтрите реагират добре на локални минимума/максимума, обособени от четири, пет и повече точки. Това е добре видимо на Фигура , например, където въпреки бързата промяна от D22-D18 към D17-D7 е запазен характерът на аномалията.

Въпреки че профил Е (Фигура 23) не попада над пещерата, нейният ефект е видим върху точките, които са в близост до нея. При останалите профили станциите над пещерата съвпадат добре с обособените понижения на аномалията. Забелязва се известно „пreekспониране“ на графиката с полиномния филтър за разлика от „Ханинг“- например, D22-D19 (Фигура),

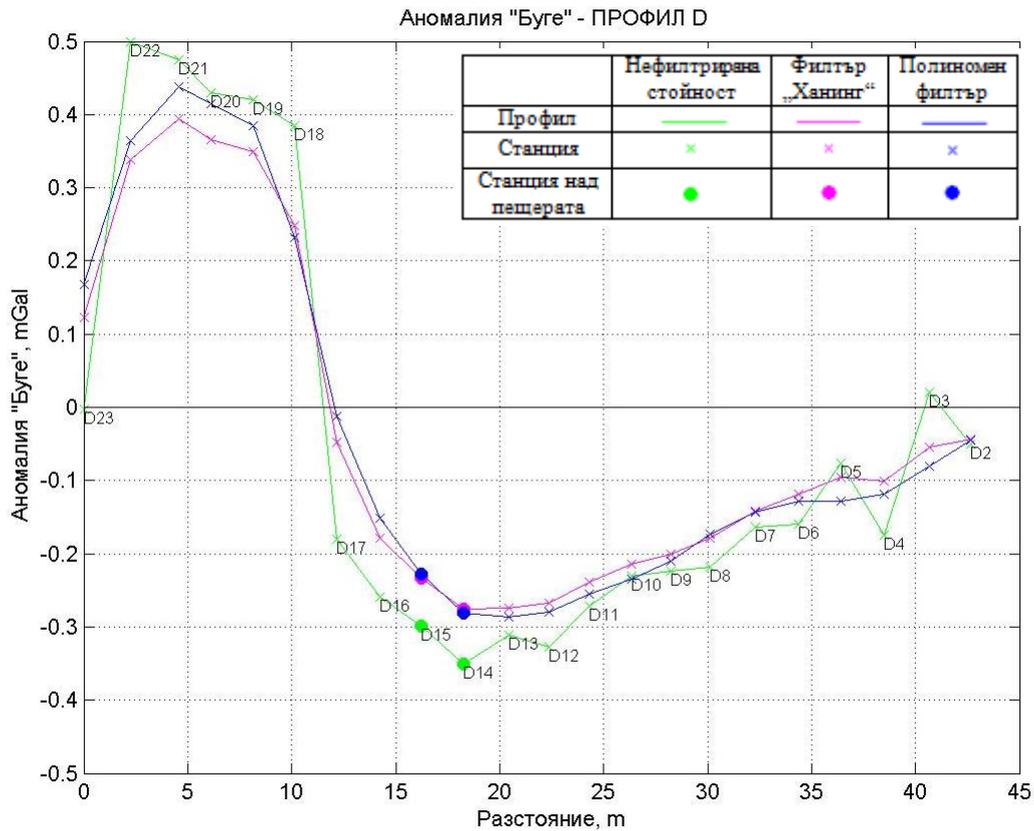
7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

C17-C13 (Фигура 25), B19-B12 (Фигура 26). Това качество е полезно за по-изразително обособяване на аномалията.

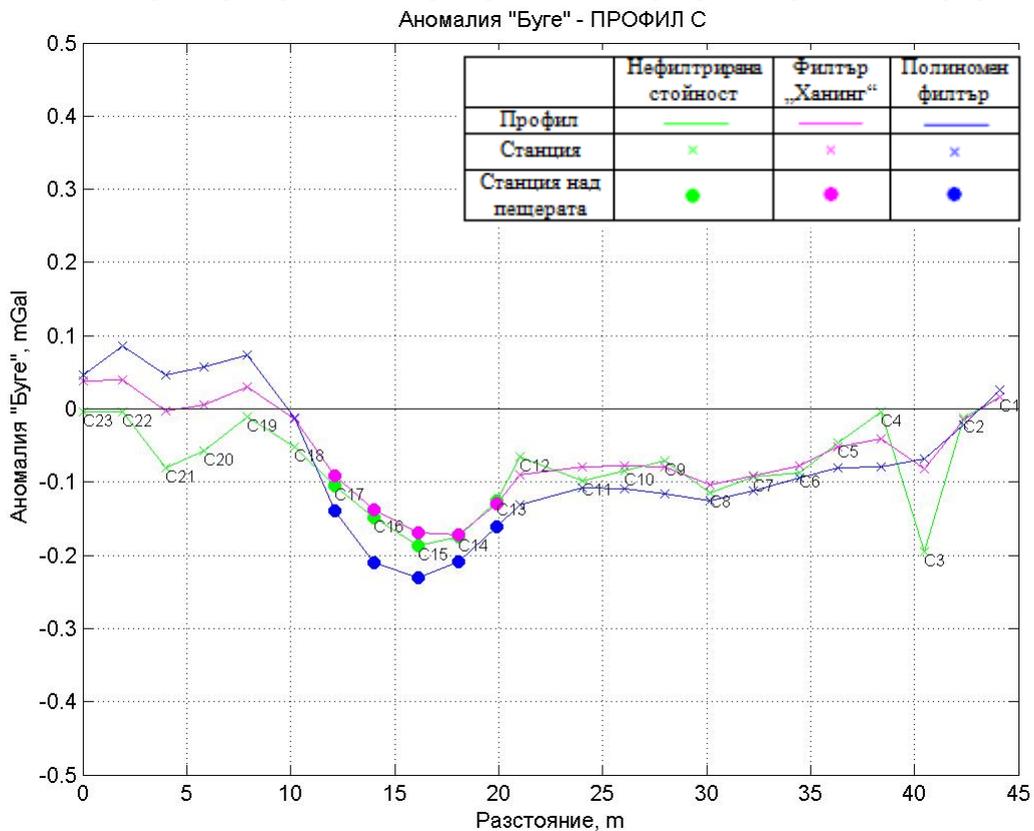


Фигура 23. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил E

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

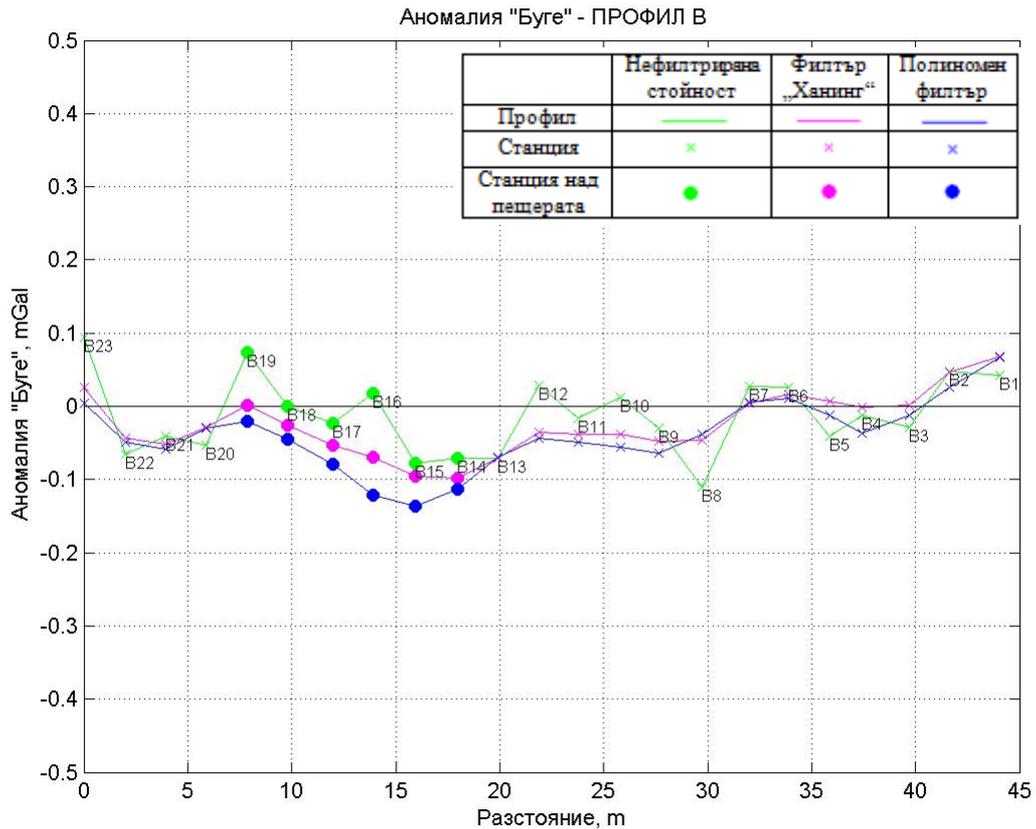


Фигура 24. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил D

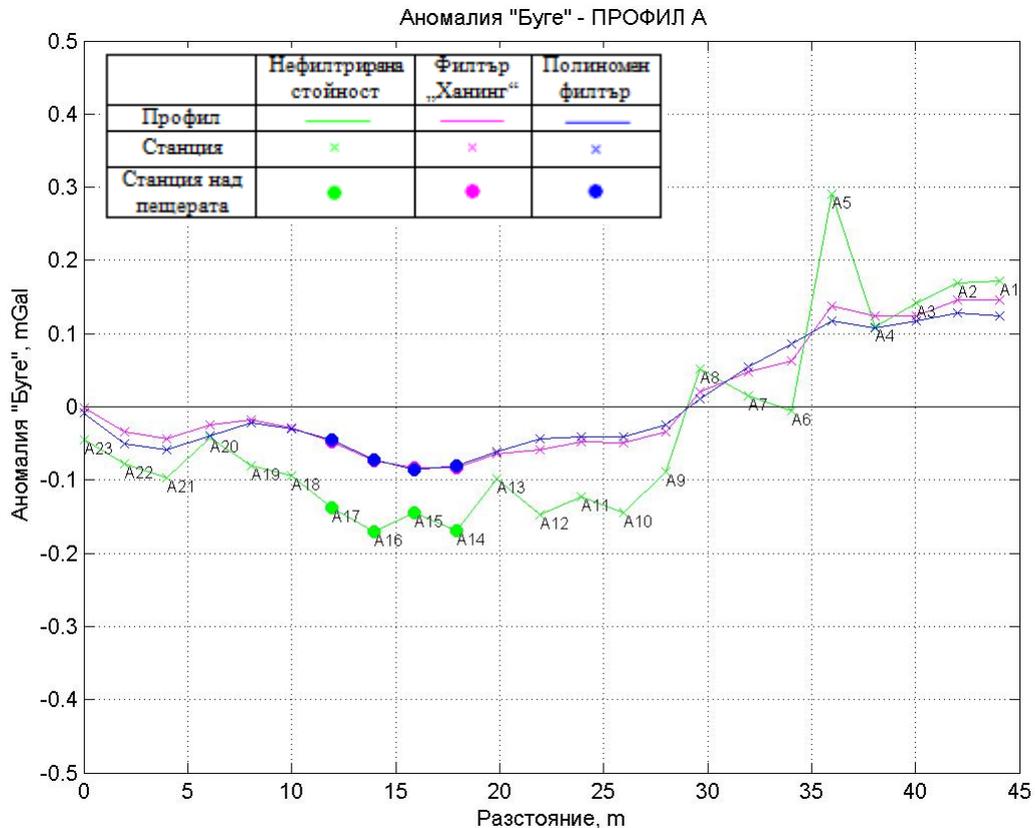


Фигура 25. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил С

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

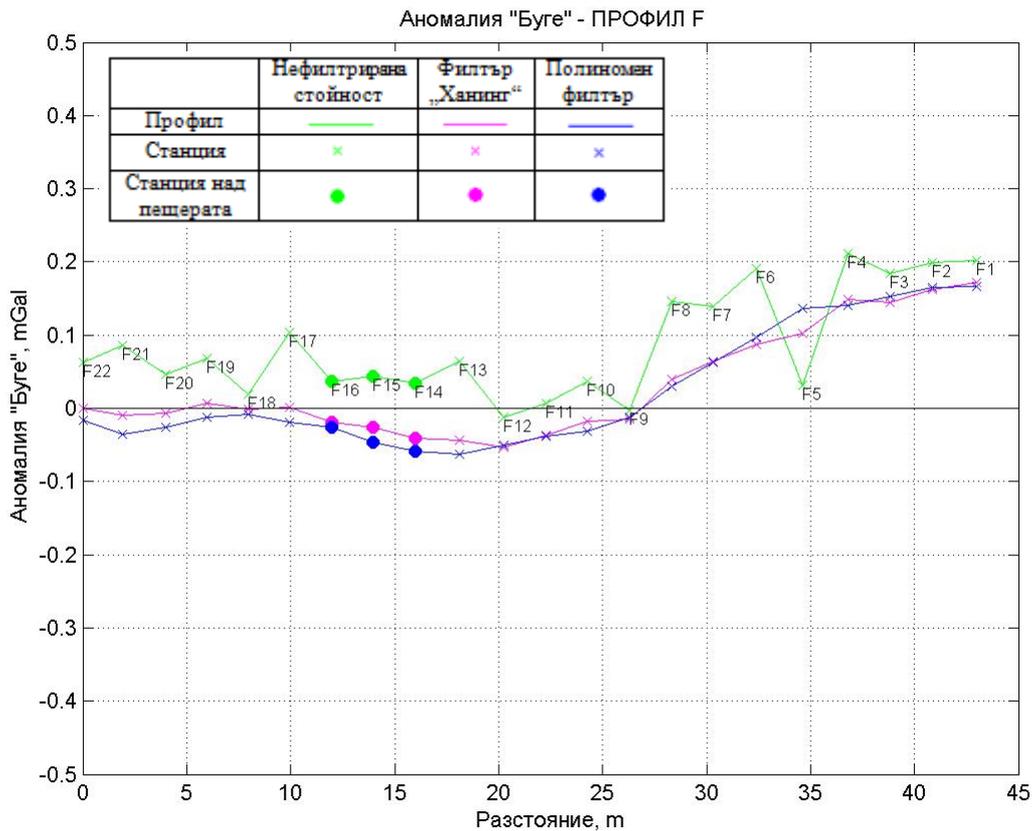


Фигура 26. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил В

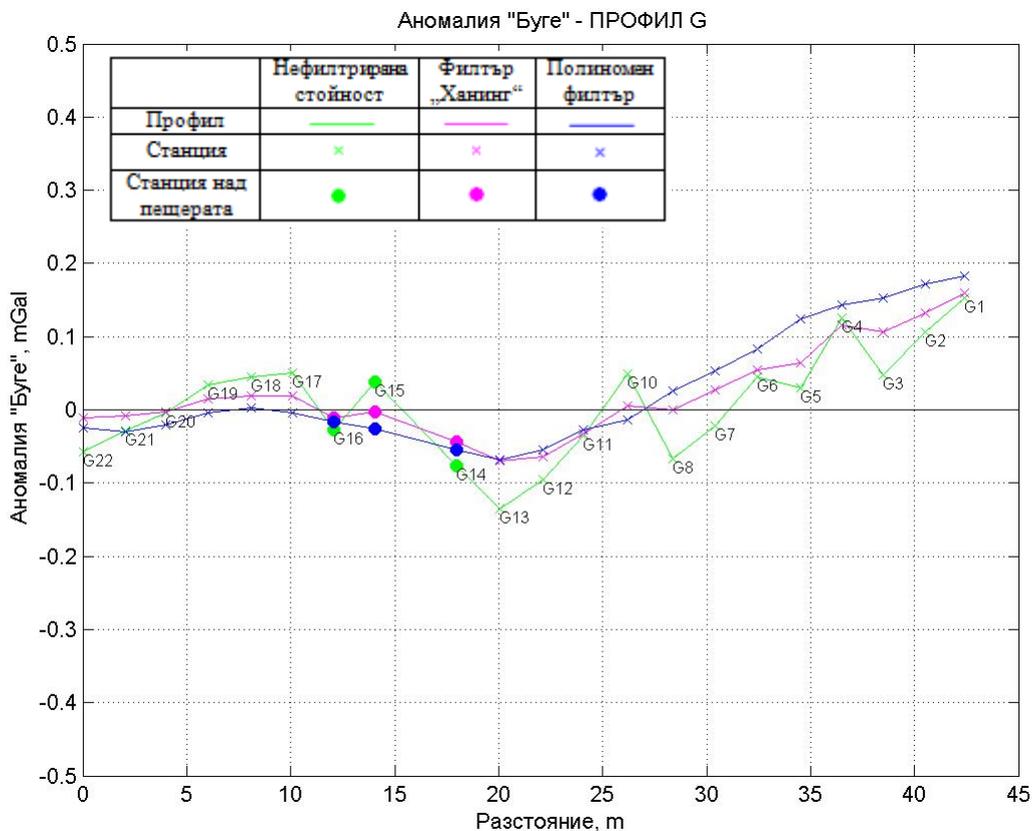


Фигура 27. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил А

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

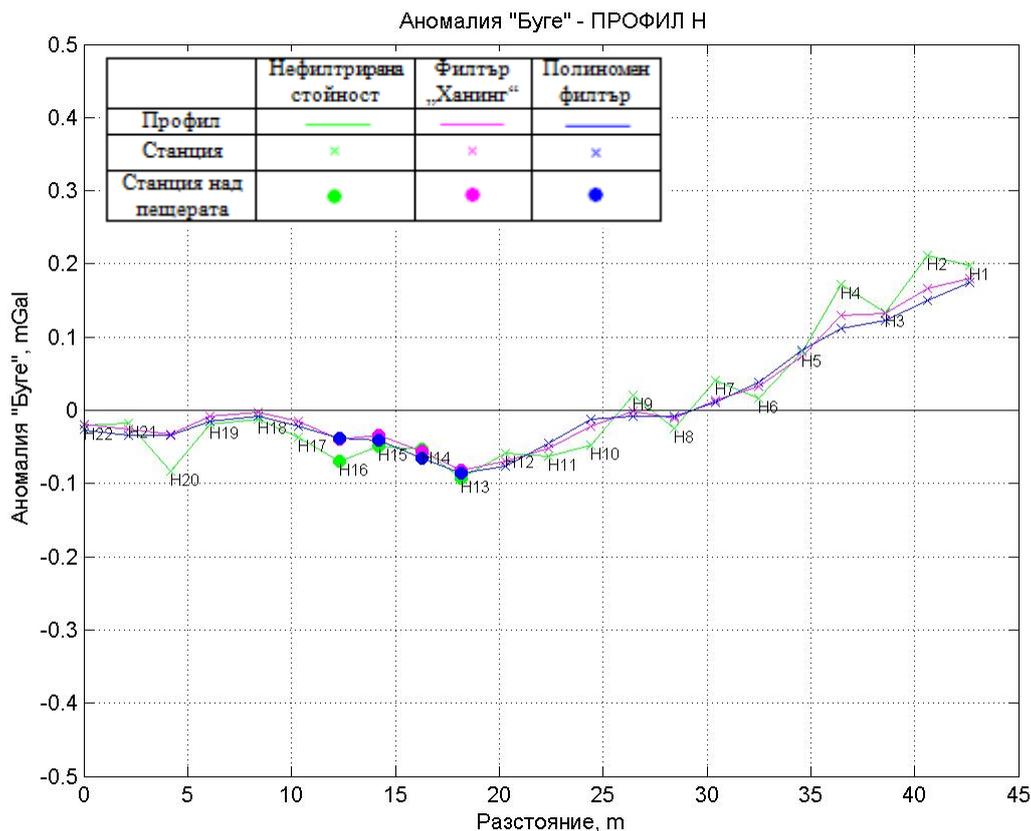


Фигура 28. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил F



Фигура 29. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил G

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



Фигура 30. Аномалия "Буге" - сурови стойности, филтрирани с "Ханинг" (прозорец 11 x 11) и полиномен филтър (2-ра степен, прозорец 41 x 41, трикратно приложен): профил Н

На Фигура 31 – 38 по профили от юг на север са представени графични съпоставки между резултатите от полиномната филтрация (трикратно приложен полином от 2-ра степен с прозорец 41 x 41) и отношението височина/дълбочина на пещерата спрямо наземните станции. От графиките на аномалията „Буге“ се вижда добро съвпадение на станциите над пещерата с локалните понижения на различните профили (например, Фигура 33 а)). В някои от профилите те не съвпадат с локалния минимум, но отклоненията са съпоставими с точността на измерванията.

Интересна информация онагледяват Фигура 31 – 36. б). На тях е представено отношението на височината на пещерата спрямо дълбочината на тавана, пода и средната им дълбочина, а между тях е заключен пещерният профил. Ясно се вижда как отношението намалява в дълбочината – като сравнение между линията на тавана и пода. С увеличаване дебелината на склона техните стойности почти съвпадат (Фигура 36. б), Фигура 37. б), Фигура 38. б)). При сравнение на всички осем фигури ясно личи колко незначителен става размерът на пещерата с нарастване на дълбочината.

Размерът на тялото спрямо средната му дълбочина е отношение, което участва при моделирането на една аномалия. То има критично значение и за

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

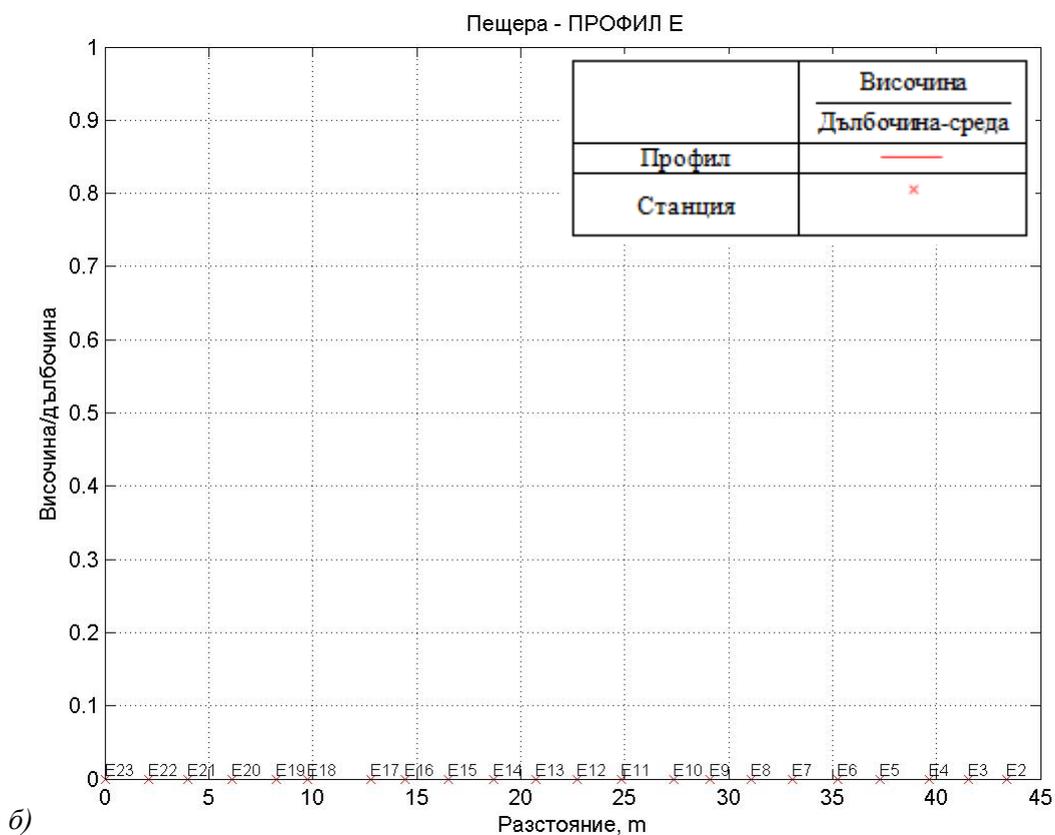
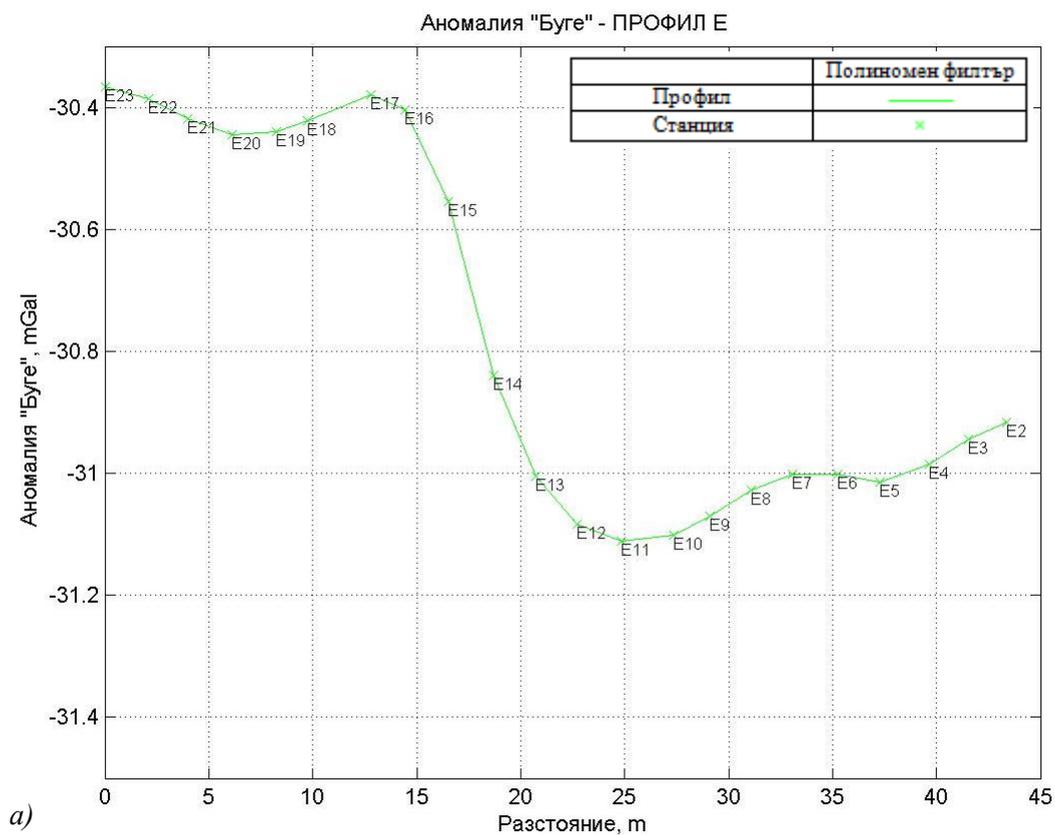
чувствителността на приложения метод. При профил D (Фигура 32. б)) отношението има максимална стойност – почти 0.60, докато при профил H (Фигура 38. б)) едва достига 0.10.

Аномалията е ясно изразена до профил C (Фигура 33), където разликата между минимума над пещерата и околни станции извън нея надвишава стойността, с която са определени гравитационните стойности. В този участък отношението височина/средна дълбочина на пещерата достига малко над 0.45. Въпреки това, до профил A (Фигура 35), се наблюдава много добро съчетание между станциите над пещерата и аномалния минимум; отношението е приблизително 0.15. Тези показания са основание да се смята, че приложената филтрация в съчетание с калибрирането на метода подобряват неговата чувствителност – до 3 пъти при конкретната плътностна разлика между кухината и обкръжаващата я скала. При профилите на север вече се наблюдава известно разминаване между станциите над пещерата и минимума на аномалията, което създава предпоставки за погрешна интерпретация на резултатите.

Обособената отрицателна аномалия западно от пещерата личи при надлъжните профили в станции B20 – B22 (Фигура 34) и A20 – A22 (Фигура 35). Стойностите им са сходни с тези в съседните станции - B17-B18 и A16-A17, поради което би могло да се твърди, че под тях има кухина с параметри като тези на пещерата под указаните точки. Поради малките стойности на обособената аномалия спрямо околните, това предположение би могло да се потвърди или отхвърли с измервания, проведени с по-чувствителен гравиметър, или с друг целесъобразен проучвателен метод.

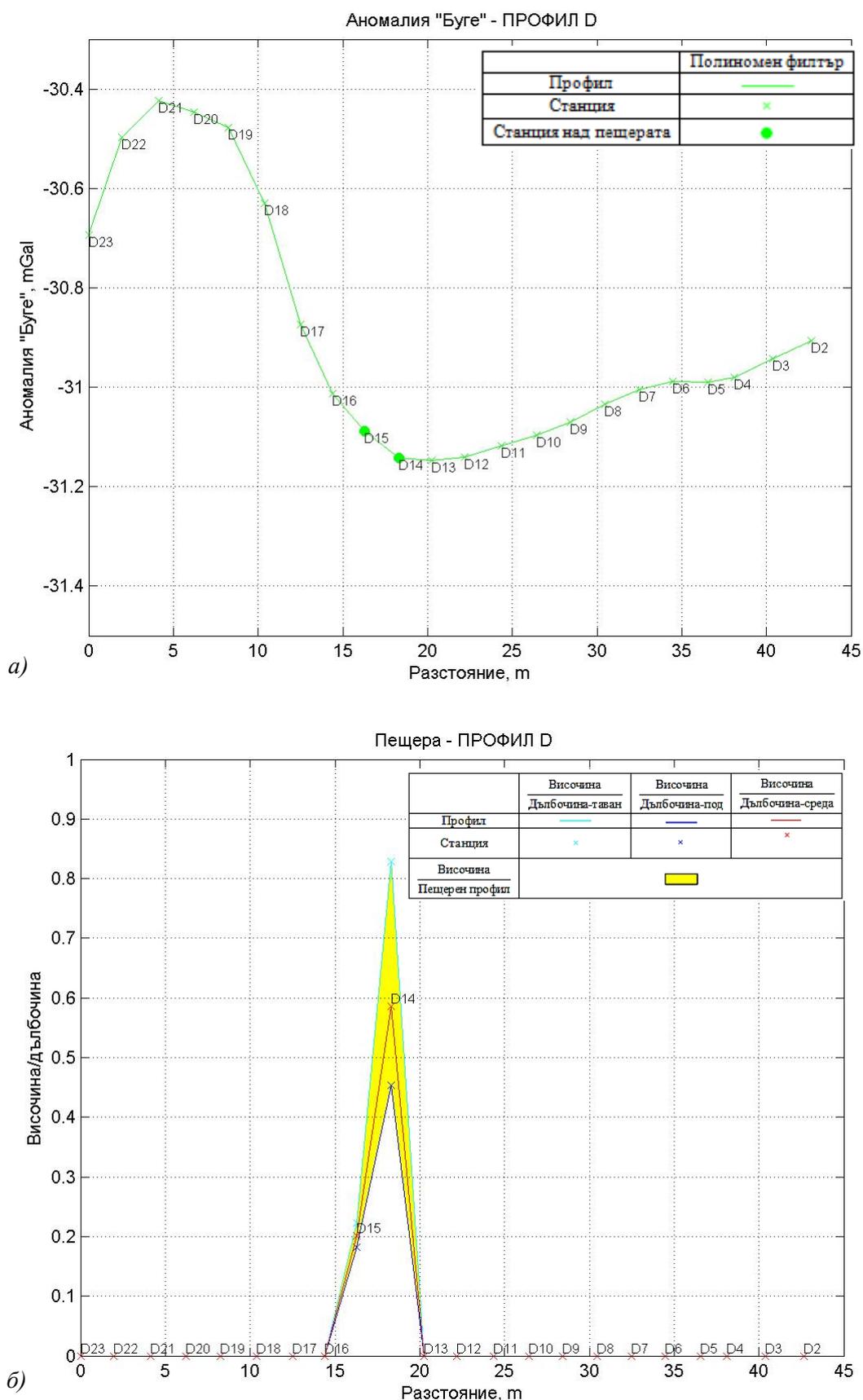
Общ анализ на гравиметрични, георадарни и магнитометрични данни потвърждава наличието на кухина западно от пещера Живата вода (при станции A20-A22, B20-B22), както и в югоизточната част на мрежата (при станции C4-C6, D4-D6, E4-E6).

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



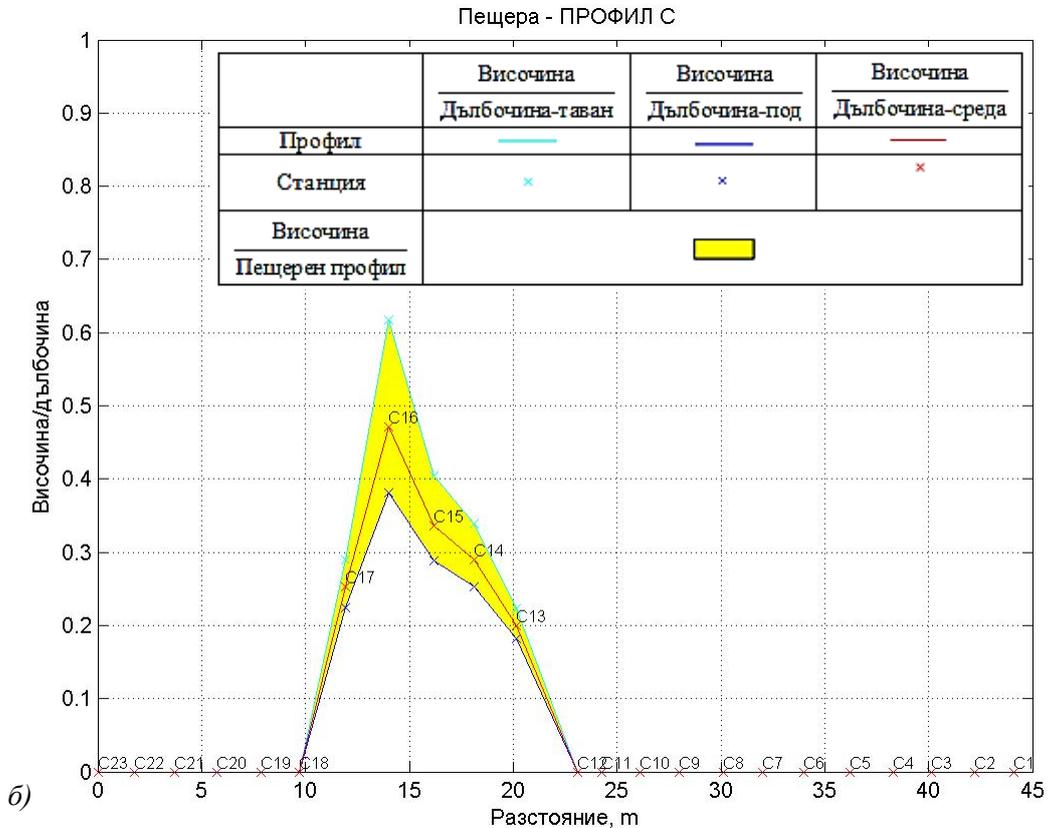
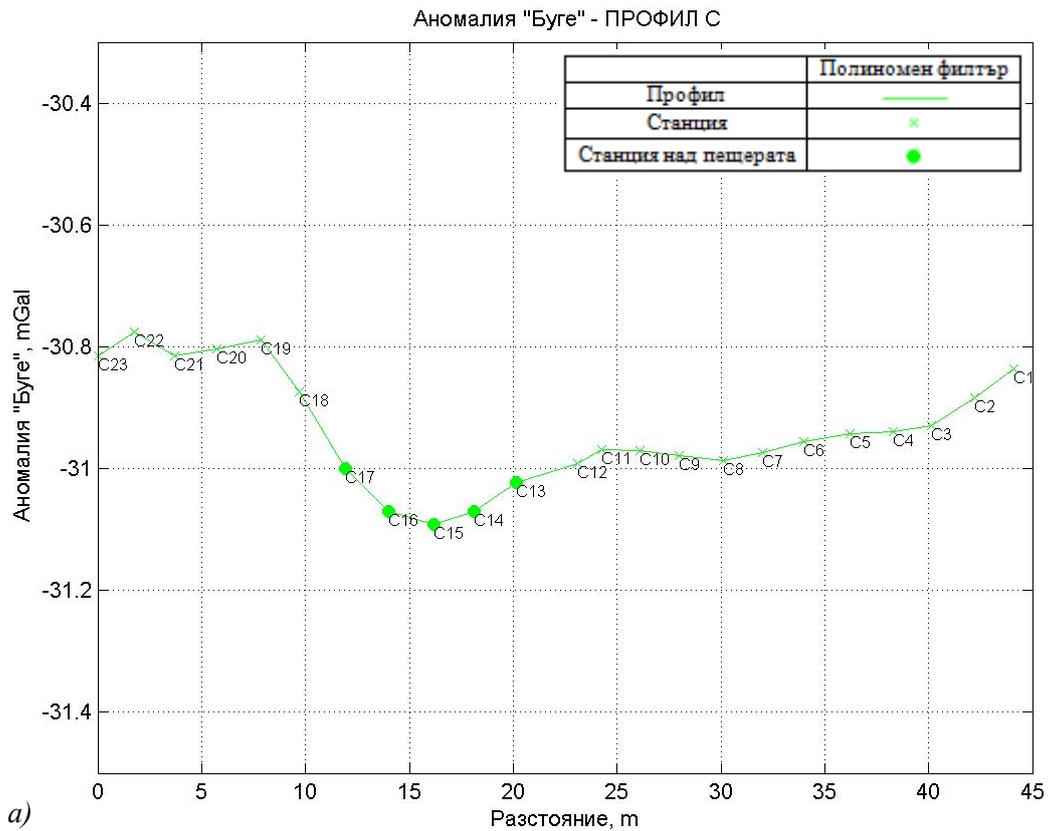
Фигура 31. Аномалия "Буге" над пещерата: профил E: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



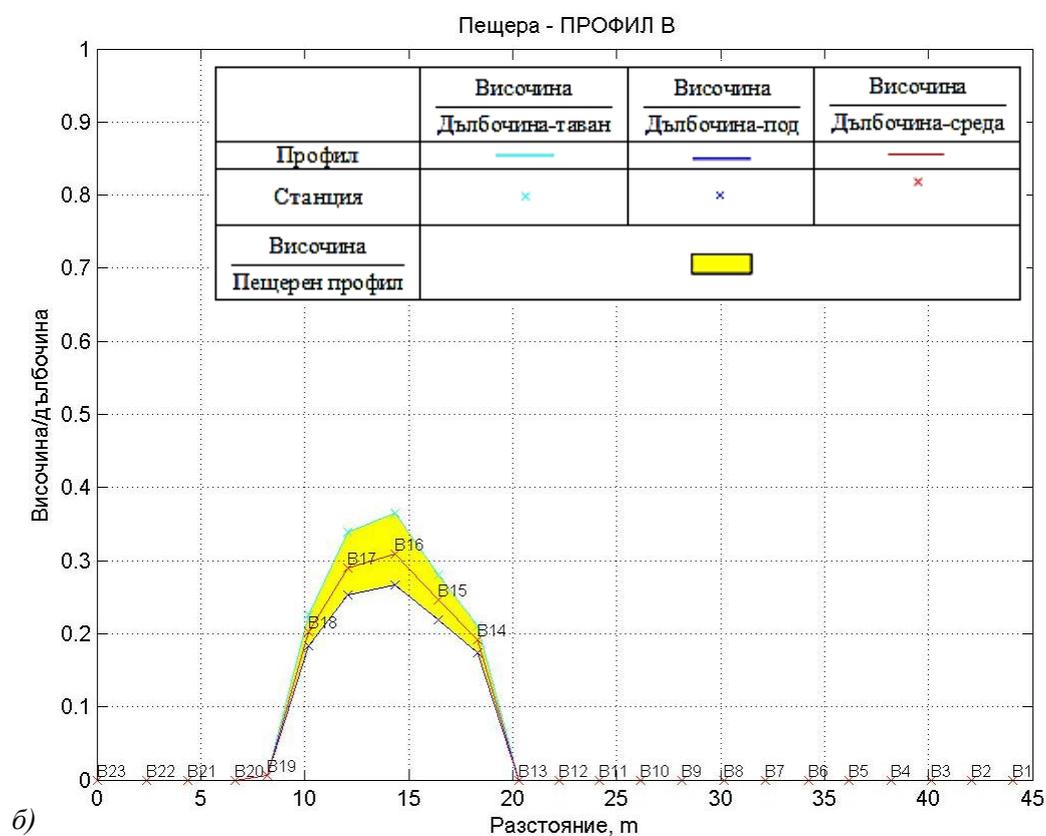
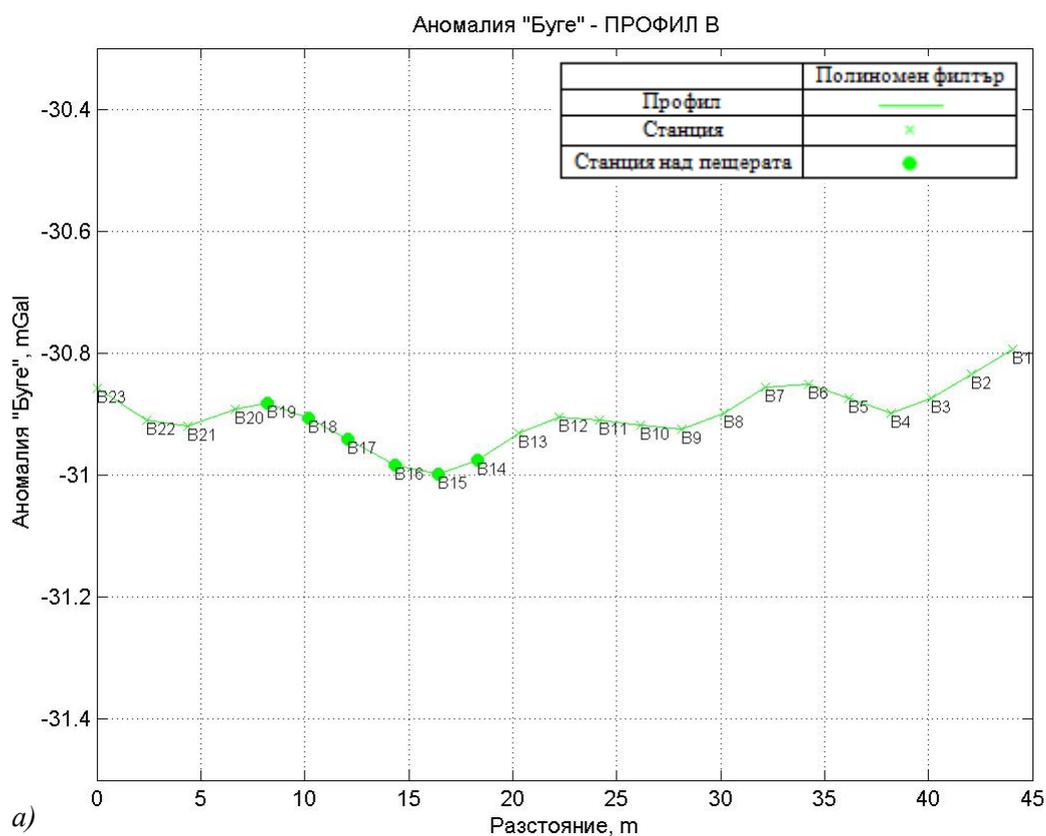
Фигура 32. Аномалия "Буге" над пещерата: профил D: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



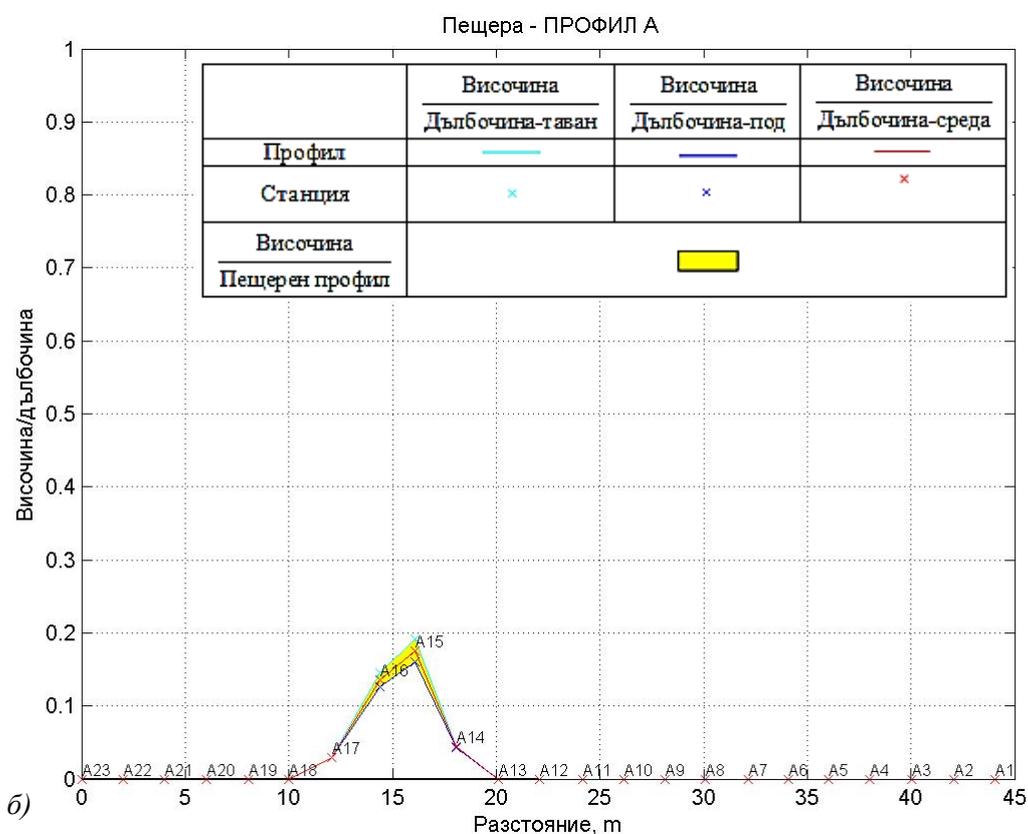
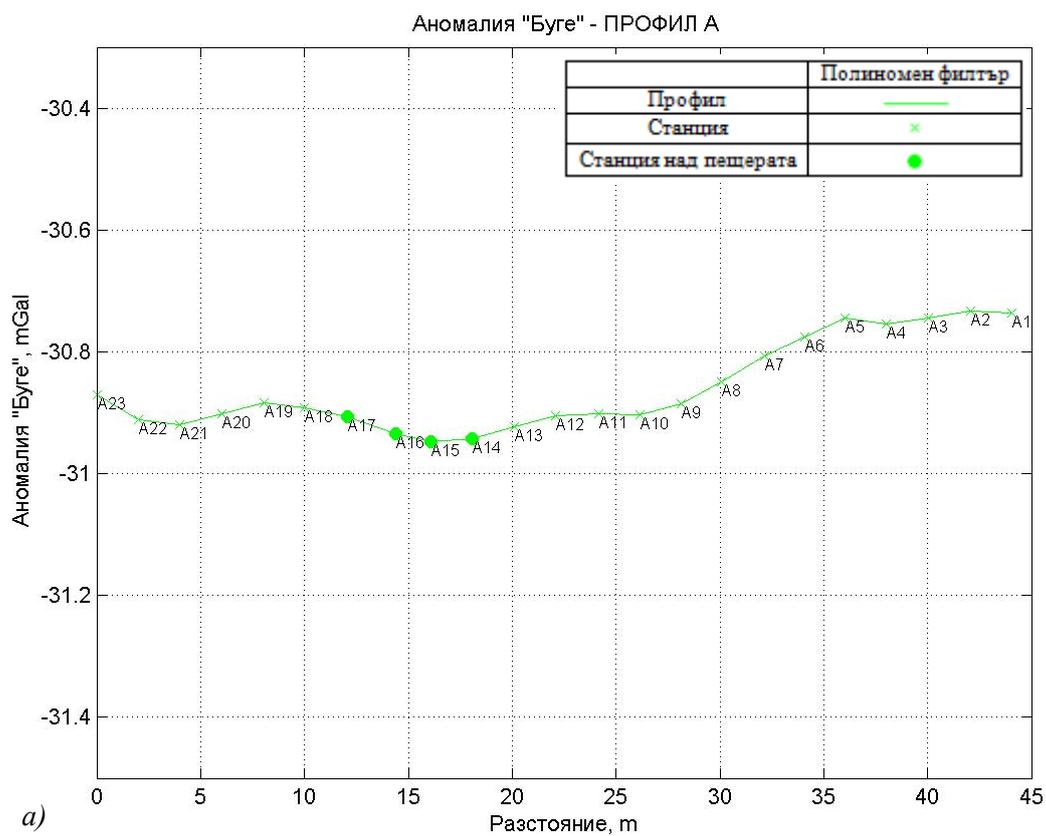
Фигура 33. Аномалия "Буге" над пещерата: профил С: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



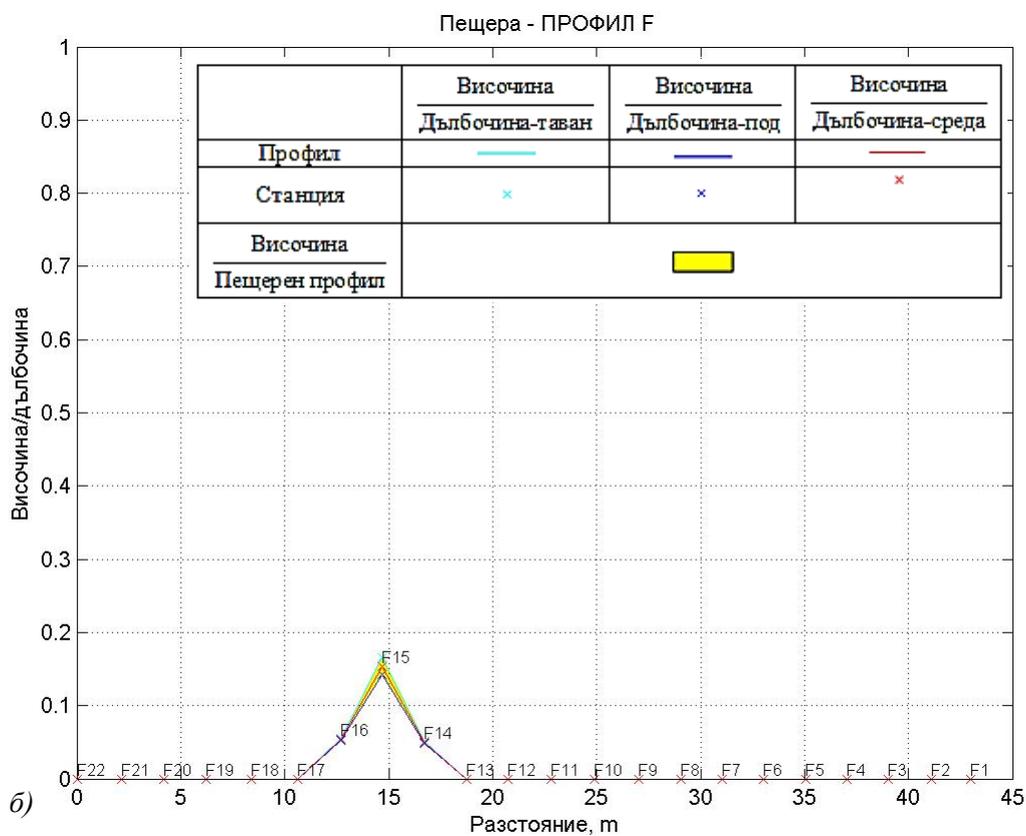
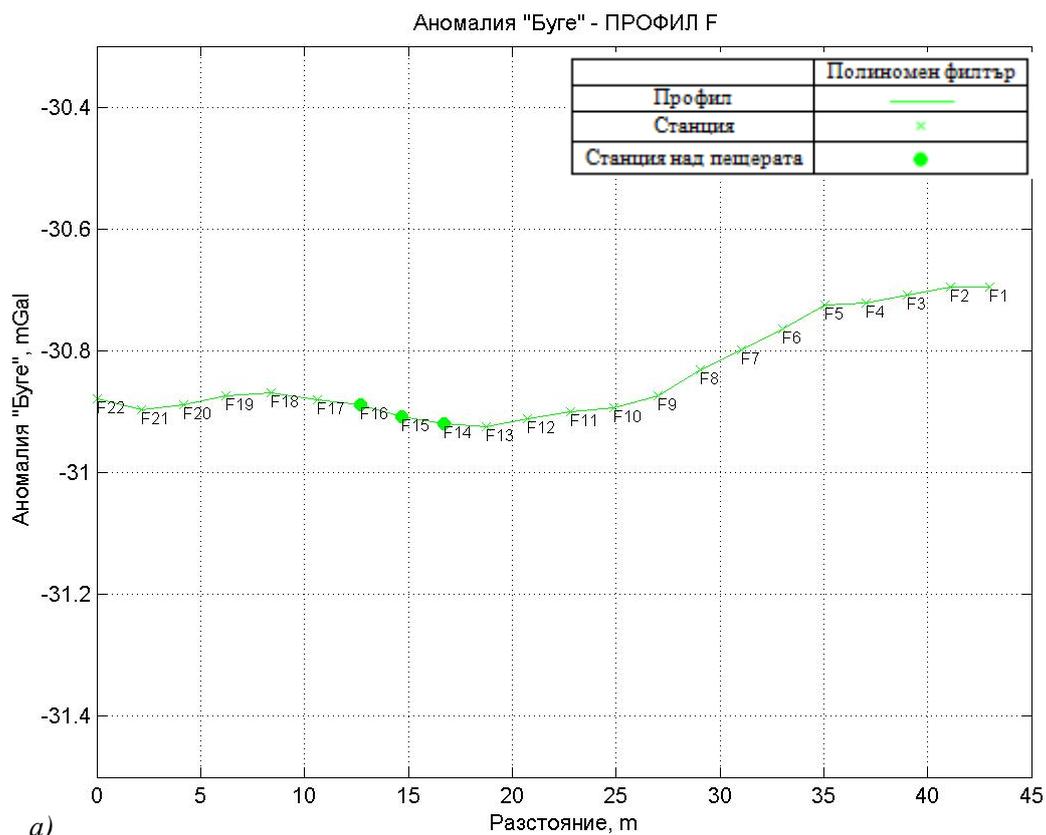
Фигура 34. Аномалия "Буге" над пещерата: профил В: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



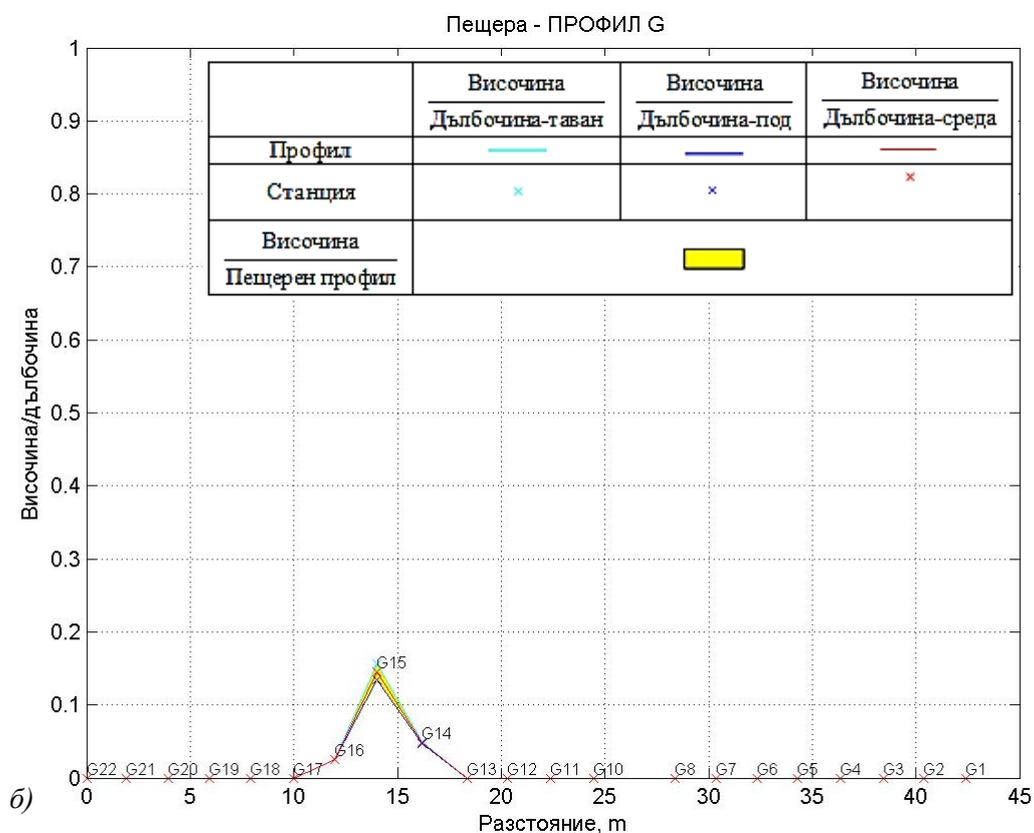
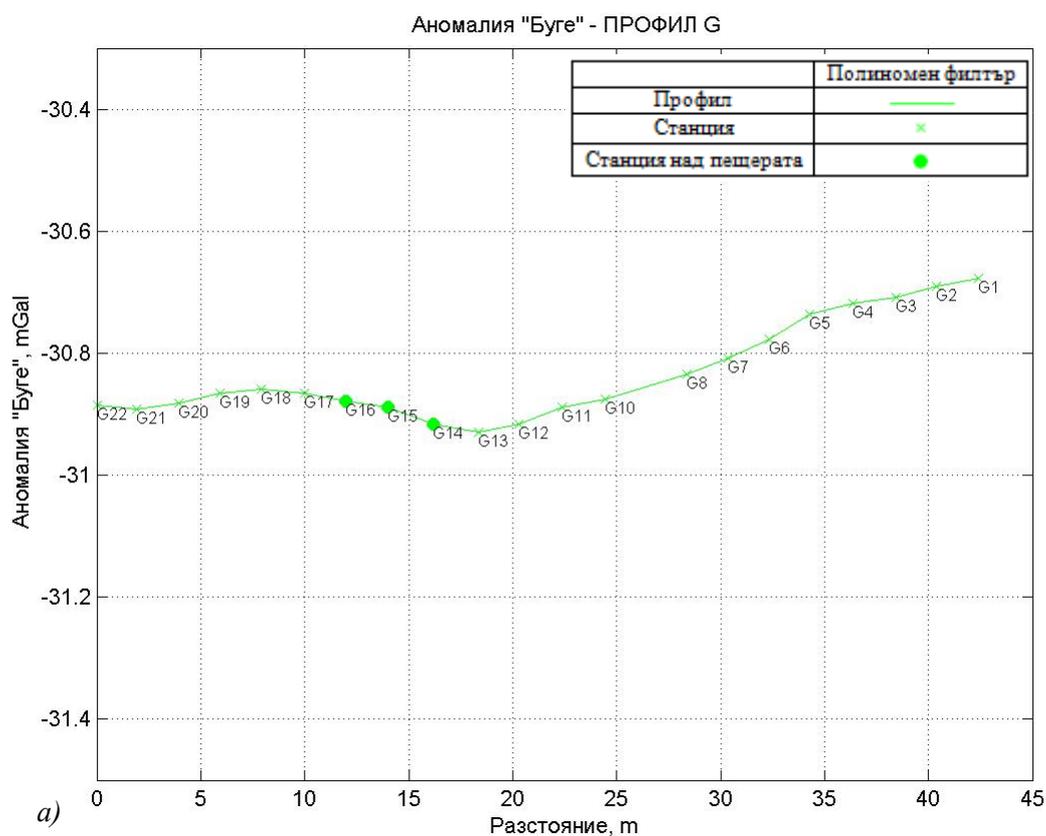
Фигура 35. Аномалия "Буге" над пещерата: профил А: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



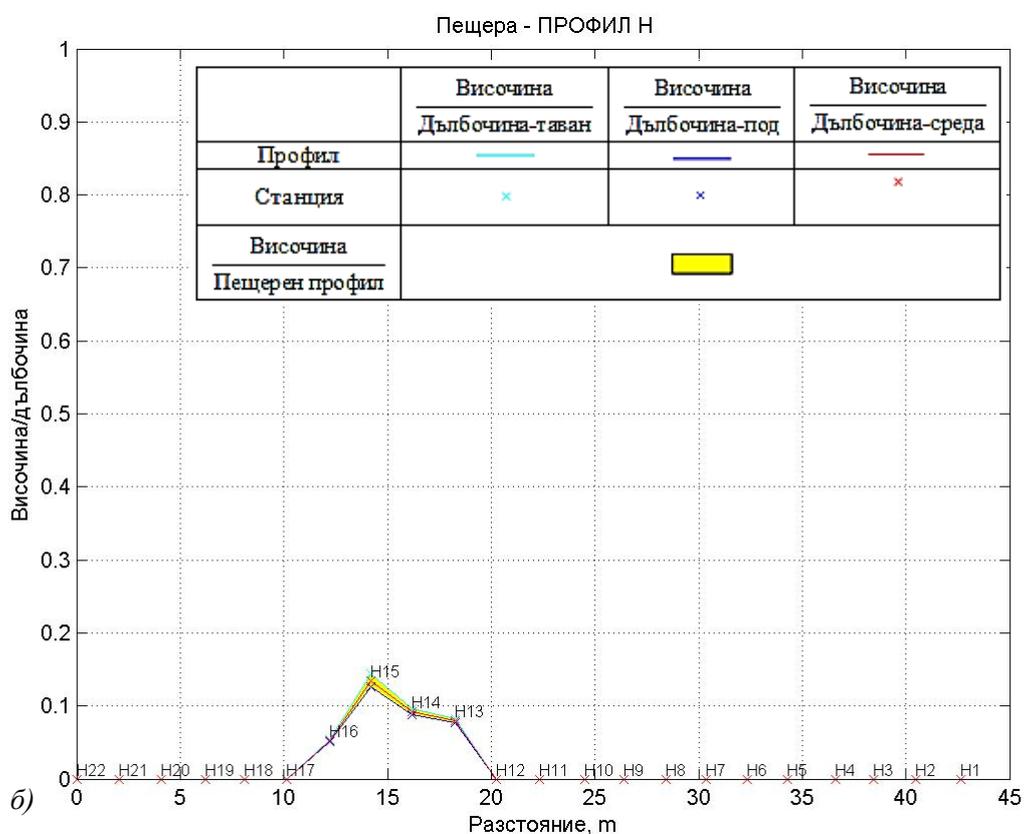
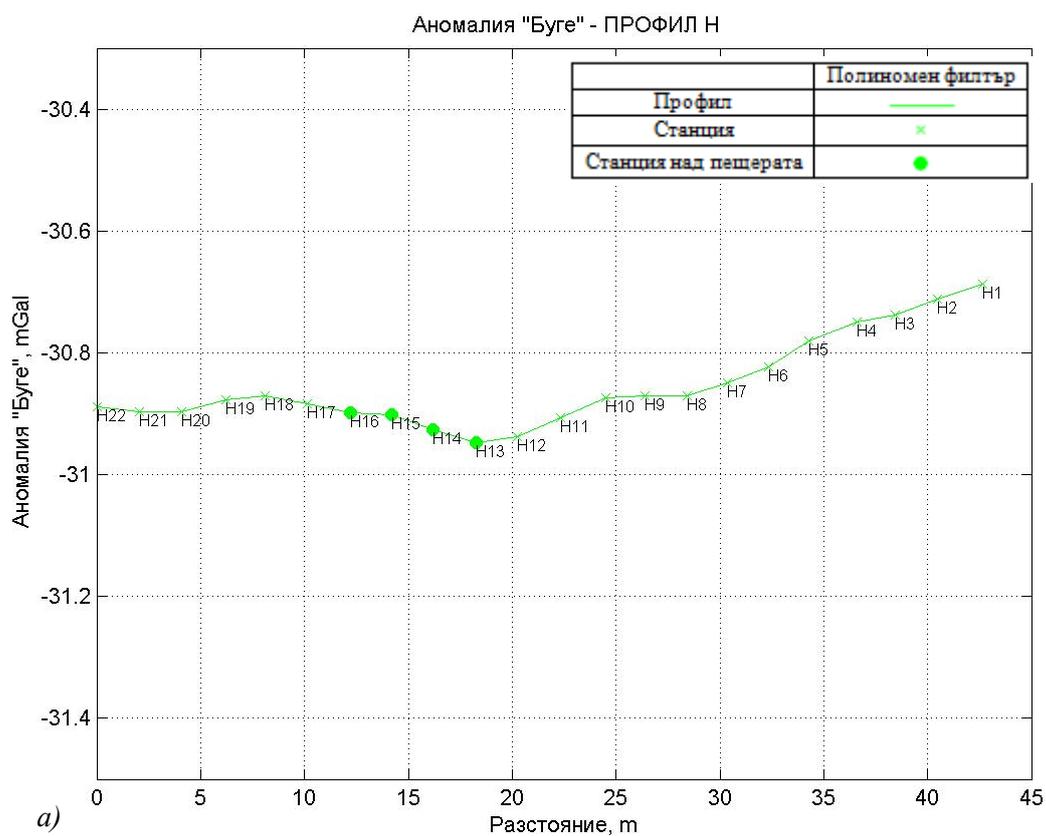
Фигура 36. Аномалия "Буге" над пещерата: профил F: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



Фигура 37. Аномалия "Буге" над пещерата: профил G: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация



Фигура 38. Аномалия "Буге" над пещерата: профил Н: а) трикратен полиномен филтър, 2-ра степен, 41 x 41 прозорец; б) отношение височина/дълбочина на пещерата.

7.4. ОБОБЩЕНИЕ

Извършена е обработка на ГНСС измерванията за определяне координатите на изходните точки и привързване на ъглово-дължинните измервания на подробните точки, измерени в пещерата, и наземните станции към тях. С получените данни е генериран тримерен пещерен модел, както и апроксимираща повърхнина на земната повърхност. От тях е извлечена информация за аномалното тяло, в това число разпространение, форма и размер.

Обработката на гравиметричните измервания е обоснована с проведените изследвания на гравиметричния дрейф. Направена е съпоставка между три изравнителни модела, като окончателен вариант е избран този с неизвестни силата на тежестта в станциите и различни скорости на дрейфа за всеки ден.

Получените стойности за аномалията „Буге“ са анализирани в съпоставка със създадения пещерен модел. Макар че в суровите резултати се открояват някои отрицателни стойности, подсказващи наличието на кухина, тяхното разпространение има твърде противоречив характер. Резките промени в отделни станции и по дължината на проведените рейсове са отстранени посредством извършването на филтрация по различни методи и параметри.

Изследвани са качествата на всеки един от методите на филтрация, като критерии са плавно изменение на данните, обособяване на аномалии в повече от една станции, без да следват гравиметричните рейсове и да преминават плавно помежду им. Решаващ критерий за утвърждаване на подходящи параметри на филтрацията е резултатите да бъдат в добро съотношение с пещерния модел. В тази връзка те могат да бъдат класифицирани в няколко групи – несъвпадение с параметрите на пещерата, съвпадение на аномалния екстремум, съвпадение с общия пещерен обем и такива на добро съчетание между двата .

Избрани са варианти от последната група от двата метода на филтрация, описващи добре общия пещерен обем – метод „Ханинг“ с прозорец 11 x 11 и трикратно приложена филтрация с полином от втора степен с прозорец 41 x 41. Те са сравнени помежду си и със суровите данни по надлъжни профили, като полиномната филтрация е избрана за по-нататъшната интерпретация поради своите по-изразени екстремни стойности.

7. Обработка на резултатите от измерванията. Анализ и интерпретация

Филтрираните аномални стойности на аномалията „Буге“ са съпоставени с отношението височина/дълбочина на пещерата, при което са изведени показатели за ефективността на метода. Интерпретацията на калибрираните с пещерния модел гравиметрични данни показва потенциална възможност за наличие на кухина западно от Живата вода. Малка по своята стойност и размери отрицателна аномалия се наблюдава и в югоизточната част на мрежата.

Стойностите на посочените две аномалии са съпоставими с точността на гравиметричните измервания. Хипотезата за тяхното наличие би могла да се провери с по-чувствителен гравиметър или друг подходящ проучвателен метод (Slavova, 2018). За целта е извършена съпоставка с георадарни и магнитометрични изследвания, която потвърждава успешното локализиране на две нови кухини в рамките на изследваната територия.

ИЗВОДИ

Локализирането на кухни с естествен или антропогенен произход е задача, чието решение е с изключителна, интердисциплинарна значимост. Проведеното изследване в теоретичен и практически аспект утвърждава и развива качествата на гравиметричните методи за постигане на поставената цел:

- Функционална, екологична и икономическа ефективност.

Съпоставката на гравиметричните методи с останалите технологии я поставя на лидерско място в разнообразието от средства за локализиране на кухни, благодарение на нейната функционална, икономическа и екологична ефективност. Въпреки че гравиметрията е една от най-старите методологии, тя бележи интензивно развитие едва през последните две десетилетия поради осъзнатата значимост на проблема и технологичния прогрес. Към днешна дата методът все още притежава някои ограничения, свързани с неговата чувствителност, зависимост от точни пространствени определения, сложни теренни условия и необходимост от допълване с информация от други източници, които са предпоставка за неговото оптимизиране.

- Повишаване значимостта на резултатите с МНМК.

Предложената технология за локализиране на кухни посредством микрогравиметрия е базирана на утвърдени в практиката технологични прийоми, които са разширени с изравнение на гравиметричните измервания по МНМК за повишаване сигурността в решението и оценка на точността. Обработката е съобразена с индивидуални характеристики на избрания гравиметър, чиито дрейф е източник на систематични грешки.

- Потвърждаване на резултатите и повишаване на чувствителността на метода посредством тримерното му калибриране.

Тъй като изравнението от своя страна е зависимо от изходните данни, измерванията и геометрията на мрежата, въведената във финалния етап филтрация на данните оказва значителен положителен ефект върху техния анализ и интерпретация. Посредством нея е редуцирано влиянието на всички фактори, които по една или друга причина не са отстранени в хода на извършените измервания и тяхната обработка. С преминаването от

противоречивата картина на суровите данни към филтрирани стойности на аномалията „Буге“ се изпълняват критериите, заложи в основата на различието между грешки и аномалии – плавно изменение на данните, без резки скокове в отделни станции или по дължината на провежданите рейсове, с добро площно разпределение и в съответствие с геоложката информация.

Въведеното калибриране на гравиметричните данни с тримерния модел на пещерата в района на измерванията е ключов фактор за постигнатите резултати. В сравнение с класическите пещерни карти, полученият модел осигурява богати възможности за анализ и интерпретация от гледна точка на формата, размерите и обема на тялото, както и дебелина на слоя над него. Информацията участва в избора на подходящи филтриращи параметри за ясно обособяване зоната на минимум на аномалията „Буге“, общото ѝ разпространение или комбинация от двете. Това позволява избор на стойности, съобразно изискванията на практиката – надеждно локализиране на мястото с най-удобен достъп до обекта или неговото разположение в пространството, които да бъдат заложи при интерпретацията на данни в околния район. Приложена съвместно с калибриране по предложения начин, филтрацията повишава чувствителността на гравиметричния метод до няколко пъти, както показват резултатите от проведеното експериментално изследване.

Получените окончателни резултати за аномалията „Буге“ лесно могат да бъдат интегрирани в една съвременна ГИС система за извършване на комплексна интерпретация за територията на изследването. Подобно мероприятие би било от полза и за изграждането на цялостна картина за района, в който попада обекта, за подобряване анализа на средата и планирането на бъдещи изследвания.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Агенция по геодезия, картография и кадастър. Инструкция No PД-02-20-25 от 20 септември 2011 г. за определяне на геодезически опорни точки с помощта на глобални навигационни спътникови системи.
2. Агенция по геодезия, картография и кадастър. Инструкция No PД-02-20-12 от 03 август 2012 г. за преобразуване на съществуващите геодезически и картографски материали и данни в „Българска геодезическа система 2005“.
3. Веселов, К. Е. (1986). Гравиметрическая съемка. Москва, 1986.
4. Голиздра, Г. Я. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. Москва, 1988.
5. Господинов, С., Пенева, Е., Беляшки, Т., Димитров, Д., & Михайлов, Г. Гравиметрични дейности за целите на геодезията в Република България. Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия, том XLIII. София, 2009, стр. 151-157.
6. Делчев, Х. Спелеология и пещерно дело. София, 1979.
7. Зидаров, Д. П. Обратна гравиметрична задача в геопроучването и геодезията. София, 1984.
8. Иванова, М. Параметрично изравнение на гравиметрични мрежи с въвеждане на скоростта на изместване на нулата като допълнително неизвестно. International Conference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection SGEM, Albena, 2005, стр. 467-471.
9. Кири, П., & Брукс, М. Введение в геофизическую разведку. Москва, 1988.
10. Костадинов, К. Н., & Вълчинов, В. Г. Математическа обработка на геодезическите измервания. София, 2012.
11. Ламбева, Т. Приложение на робастни методи при оценка на гравиметрични мрежи. Геомедия, София, 2015.
12. Любимов, Г. А., Любимов, А. А. Методика гравимагнитных исследований с использованием ЭВМ. Москва, 1988.
13. Макаров, Н. П. Геодезическая гравиметрия. Москва, 1968.
14. Макаров, Н. П. Геодезическая гравиметрия. Москва, 1968.
15. Милев, Г., Михайлов, Е., Цанков, Х., Димовски, С. Систематизация и привеждане на гравиметричните точки на територията на България в единна система. “Съвременните технологии, образованието и

- професионалната практика в геодезията и свързаните с нея области”.
София, 2013.
16. Михайлов, Е., Димитър, Д., Стоянов, Л., Еверхард, М. Резултати от гравиметрични изследвания в южната зона на Софийската котловина. Геонауки, София, 2006, стр. 370-372.
 17. Михайлова, Б., Митев, А., Бендерев, А., Шанов, С. Хидрогеоложки и геофизични изследвания за локализиране речното подхранване на подземните води в Боснешкия карстов район. Геонауки, София, 2006.
 18. Попов, В. Пътешествие под земята. София, 1982.
 19. Радичев, Р., Михайлов, Е., Кисьов, А. Гравиметрични поправки и фактори влияещи на високоточните измервания. Годишник на минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", том 56, част I, София, 2013.
 20. Русев, А.. ГИС - Клуб "Екстрем". 2015.
 21. Русев А., Славова Т., Гюров Р. Изследване с GPR (Ground Penetration Radar) за откриване на нови подземни кухини в района на пещера Духлата. Балканска спелеоложка конференция „София 2014“, 28-30/03/2014, София, България, стр. 47-51, ISBN 978-954-90434-2-6.
 22. Славова Т. Подземно царство: Ad augusta, per angusta. Списание „Знание“, брой 85, януари 2017, стр. 36-41.
 23. Славова Т., Русев А. Мултисензорно локализиране на пещери. Списание „Геомедия“, брой 6, 2016, стр. 32-36.
 24. Славова Т. История за Живата вода и гравиметрията. Сп. „Българска наука“, бр. 77, 2015, стр. 66-77, ISSN 1314-1031
 25. Славова, Т., Русев, А., Камбуров, А. (2014). Геодезическо заснемане в пещера Живата вода, Боснешки карстов район. Балканска спелеоложка конференция „София 2014“, 28-30/03/2014, София, стр. 52-54.
 26. Славова Т. Анализ на прилаганите гравиметрични методи за локализиране на дълбочинно разположени кухини. Сп. „Българска наука“, бр. 64, 2014, стр. 72-80, ISSN 1314-1031.
 27. Стойнов, В. П. Физическа геодезия. София, 1974.
 28. Стрезов, А., Съйнов, П. Боснек и Боснешкия карстов район. България. 1984. <http://www.clubextreme.org/node/395> .
 29. Успенский, Д. Г. Гравиразведка (гравиметрический метод при геологических исследованиях, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых). Ленинград, 1968.

30. Цанков, Х., Папратилов, И. Програма за решаване на обратната гравиметрична задача чрез оптимизиране на модели съставени от краен брой триизмерни призматични тела. Годишник на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски", том 56, София, 2013.
31. Ценков, Ц., Георгиев, И., Пашова, Л., Радев, И., Георгиев, Д. Мониторинг на свлачищните процеси в района на Ботаническата градина на БАН, София. Геонауки, София, 2006, стр. 362-365.
32. Юзефович, А. П., Огородова, Л. В. Гравиметрия. Москва, 1980.
33. Abt, T. L. Detection of a Local Mass Anomaly in the Shallow Subsurface by Applying a Matched Filter. Ohio, 2011.
34. Alp, H., Albora, A., & Tur, H. A View of Structure and Gravity Anomalies of Hatay Region Souther Turkey Using Wavelet Analysis. Journal of Applied Geophysics, 2011, p. 498-505.
35. Apell, B. Examination of Gravity Data Filters Constructed by the Least Squares Method. J. H. Pasma. 1979.
36. Benito, G., & Perez Del Campo, P.. Sinkhole Evolution in Alluvial Deposits within the Central Ebro Basin, Northeast Spain. Fourth International Symposium on Land Subsidence, 1991, p. 323-331.
37. Beres, M., Luetscher, M., & Olivier, R. Integration of Ground-penetrating Radar and Microgravimetric Methods to Map Shallow Caves. Journal of Applied Geophysics , 2001, p. 249-262.
38. Berrino, G., Corrado, G., & Riccardi, U. On the Capability of Reverting Gravity Stations to Detect Signals Coming from Volcanic Activity: The Case of Vesuvius. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, p. 270-282.
39. Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. Water Losses from the Ričice Reservoir Built in the Dinaric Karst. Engineering Geology, 2008, p. 121-127.
40. Bonacci, O., & Rubinic, J. Water Losses from a Reservoir Built in Karst: the Example of the Boljuncica Reservoir (Istria, Croatia). Environmental Geology, 2008.
41. Bouyahiaoui, B., Abtout, A., Bayou, Y., Bendali, M., Boukerbout, H. Identification of Subsurface Cavities in Urban Environment. Scientific Reports, 2025.
42. Bouyahiaoui, B., Abtout, A. Detection of Cavities in an Urban Environment: Case of M'Rara Region (Northeast of Algeria). Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Barcelona, 18-21 June 2024.

43. Brinkmann, R., & Parise, M. Karst Environments: Problems, Management, Human Impacts, and Sustainability: an Introduction to the Special Issue. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2012, p. 135-136.
44. British Columbia, Ministry of Forests. *Karst Management Handbook for British Columbia*. Victoria, B.C, 2003.
45. 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, p. 9-16.
46. Butler, D. K. Microgravimetric and Gravity Gradient Techniques for Detection of Subsurface Cavities. *Geophysics*, Vol. 49, 1984, p. 1084-1096.
47. Butler, S. L., Sinha, G. Forward Modeling of Applied Geophysics Methods Using Comsol and Comparison with Analytical and Laboratory Analog Models. *Computers and Geosciences*, 2012, p. 168-176.
48. Carbone, D., Antoni-Micollier, L., Hammond, G., de Zeeuw-van Dalssen, E., Rivalta, E., Bonadonna, C., Messina, A., Lautier-Gaud, J., Toland, K., Koymans, M., Anastasiou, K., Bramsiepe, S., Cannavo, F., Contrafatto, D., Frischknecht, C., Greco, F., Marocco, G., Middlemiss, R., Menoret, V., Noack, A., Passarelli, L., Paul, D., Prasad, A., Siligato, G., Vermeulen, P. The Newton-g Gravity Imager: Toward New Paradigms for Terrain Gravimetry. *Frontiers in Earth Science* 8, 2020.
49. Castillo, J. 25 Most Spectacular Sinkholes Ever. 2013. <http://list25.com/25-most-spectacular-sinkholes-ever/>
50. Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., Bosch, F. P. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hidrogeology Journal*, 2011, p. 1169-1180.
51. Chico, R. J. Detection of Caves by Gravimetry. *International Journal of Speleology*, Vol. 1, 1964, p. 101-112.
52. Corchete, V., Chourak, M., & Khatlach, D. A methodology for Filtering and Inversion of Gravity Data: an Example of Application to the Determination of the Moho Undulation in Morocco. *Engineering*, 2010, p. 149-159.
53. da Silva Junior, J. S., & Fonseca Ferreira, F. J. Gravimetry Applied to Water Resources and Risk Management in Karst Areas: a Case Study in Parana State, Brazil. XXIII FIG Congress: Shaping the Change. Munich, 2006.

54. Davis, K., & Batzle, M. Time-lapse Gravity Monitoring: A systematic 4D Approach with Application to Aquifer Storage and Recovery. *Geophysics*, 2008, p. 61-69.
55. DeNosaquo, K. R., Smith, R. B., Lowry, A. R. Density and Lithospheric Models of the Yellowstone-Snake River Plain Volcanic System from Gravity and Heat Flow Data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, p. 108-127.
56. Department of Environmental Protection. Standart References for Geophysycal Investiogations. Commonwealth of Massachusetts. 1994.
57. Deroussi, S., Diament, M., Feret, J. B., Nebut, T., Staudacher, T. Localization of cavities in a thick lava flow by microgravimetry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, p. 193-198.
58. Dublyansky, Y. V., & Smirnov, S. Z. Cavity-based Secondary Mineralization in Volcanic Tuffs of Yucca Mountain, Nevada: a New Type of the Polymineral Vadose Speleothem, or a Hydrothermal Deposit? *International Journal of Speleology*, 2005, p. 25-44.
59. 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.
60. Erkan, K., Jekeli, C. A Comparative Analysis of Geophysycal Fields for Multi-Sensor Applications. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, p. 142-150.
61. Escobar, I. P., Berquo, F. R., Papa, A. R. Adjustment of Gravity Observations towards a Microgal Precision. *International Journal of Geosciences*, 2013, p. 98-107.
62. Fugro Ground Geophysics. Birrindudu Detailed Gravity Survey, NT 2005 : Logistics Report, 2005.
63. Gunn, J. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. New York: Taylor and Francis Group, 2004.
64. Hall, M. Microgravity's Use in the Detection of Near-Surface Voids (Theory and Practice). *www.caves.com : The Magazine*, 2003, p. 12-14.
65. Happer, W. *Characterization of Underground Facilities*. McLean, Virginia, USA: The MITRE Corporation, 1999.
66. Heiskanen, W. A., Moritz, H. *Physycal Geodesy*. Graz. 1993.
67. Ho, H. C. The Role of Karst in Engineering and Environmental Geosciences. *Solid Earth*, 2011, p. 155-158.
68. Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H. *Physycal Geodesy*. Wien, 2005.

69. Hoover, R. A. Geophysical Choices for Karst Investigations. Proceedings of the 9th Multidisciplinary Conference on Sinkholes & the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Huntsville Alabama, 2003, p. 529-538.
70. Hunt, T. M. Five Lectures on Environmental Effects of Geothermal Utilization: Lecture 5. Microgravity Monitoring. United Nations University, Reykjavik, 2001.
71. Hwang, C., Wang, C.-G., Lee, L.-H. Adjustment of Relative Gravity Measurements Using Weighted and Datum-free Constraints. Computers & Geosciences, 2002, p. 1005-1015.
72. 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 Chetsu-oki Events in 2007. Journal of Geodynamics, 2009, p. 260-268.
73. Jacob, T., Pannet, P., Beaubois, F., Baltassat, J., Hannion, Y. Cavity Detection using Microgravity in a Highly Urbanized Setting: A Case Study from Reims, France. Journal of Applied Geophysics, 2020.
74. Jacob, T., Bayer, R., Chery, J., Jourde, H., Le Moigne, N., Boy, J.-P. Absolute Gravity Monitoring of Water Storage Variation in a Karst Aquifer on the Larzac Plateau (Southern France). Journal of Hydrology, 2008, p. 105-117.
75. Jacob, T., Chery, J., Bayer, R., Le Moigne, N., Boy, J.-P., Vernant, P., и др. Time-lapse Surface to Depth Gravity Measurements on a Karst System Reveal the Dominant Role of the Epikarst as a Water Storage Entity. Geophysical Journal International, 2009, p. 347-360.
76. Jarvis, T. The Money Pit: Karst Failure of Anchor Dam, Wyoming. Oregon State University. Oregon, 2003.
77. Kadirov, F. A. Filtering of Gravity Data Using the Hartley Transform: a Case Study of the Kura Intermontane Trough. Physics of the Solid Earth, 2000, p. 866-871.
78. Knez, M., Slabe, T. Karstology in Motorway Construction on Classical Karst. Geografski Vestnik 84-1, 2012, p. 77-86.
79. Koop, R., Rummel, R. The Future of Satellite Gravimetry. Noordwijk, 2007.
80. LaCoste & Romberg. Instruction Manual Model G & D Gravity Meters. Austin, Texas, 2004.

81. Lange, A. L. Geophysical Studies at Kartchner Caverns State Park, Arizona. *Journal of Cave and Karst Studies* , 1999, p. 68-72.
82. Martin, A., Nunez, M. A., Gili, J. A., Anquela, A. B. A Comparison of Robust Polynomial Fitting, Global Geopotential Model and Spectral Analysis for Regional-Residual Gravity Field Separation in the Donana National Park (Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 2011, p. 327-337.
83. Martinez-Moreno, F. J., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo-Zaldivar, J., Martos-Rosillo, S., Gonzalez-Castillo, L. Combined Microgravity, Electrical Resistivity Tomography and Induced Polarization to Detect Deeply Buried Caves: Algaiddilla Cave (Southern Spain). *Engineering Geology*, 2013, p. 67-78.
84. Masson, F., Viville, D., Pierret, M.-C., Mouyen, M., Hecker, L., Chabaux, F. Time-lapse Microgravity Study of the Strengbach Catchment (Vosges Mountains, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, p. 357-365.
85. 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*, 2002, p. 552-557.
86. Merriam, J. B. Atmospheric Pressure and Gravity. *Geophysical Journal International*, 1992, p. 488-500.
87. Meuers, B. Gravity Anomaly Determination in Mountainous Areas - General Aspects Revisited. *Journées Luxembourgeoises de Géodynamique 90th*, November 4-6, 2002.
88. Mickus, K. *Gravity Method: Environmental and Engineering Applications*. Springfield, 2003.
89. Milanovic, P. T. *Water Resources Engineering in Karst*. Boca Raton, Florida, 2004.
90. Minalliance. *100 Innovations in the Mining Industry*. Montreal, 2012.
91. Mochales, T., Casas, A. M., Pueyo, E. L., Pueyo, O., Roman, M. T., Pocovi, A. Detection of Underground Cavities by Combining Gravity, Magnetic and Ground Penetrating Radar Surveys: A Case Study from Zaragoza Area, NE Spain. *Environmental Geology*, 2008, p. 1067-1077.
92. Murray, A. S., Tracey, R. M. *Best Practice in Gravity Surveying*. Canberra, 2001.
93. Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y.. The Historical Development of the Gravity Method in Exploration. *Geophysics*, vol. 70, 2005.

94. Nikolova, M. Detecting Caves Using Microgravimetry: a Study on the Prohodna Cave. The CLGE Young Surveyors' Contest 2023.
95. Pacheco, J., Arzate, J., Bojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., Ochoa, G. (Engineering Geology). Delimitation of Ground Failure Zones Due to Land Subsidence Using Gravity Data and Finite Element Modeling in the Queretaro Valley, Mexico. 2006, p. 143-160.
96. Padin, J., Martin, A., Anquela, A. Archeological Microgravimetric Prospection inside Don Church (Valnecia, Spain). Journal of Archeological Science, 2011, p. 547-554.
97. Palmer, A. N. Cave Geology. Dayton, Ohio, 2007.
98. 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, 2009, p. 237-254.
99. Pasteka, R., Kusnirak, D., Wilken, D., Putiska, R., Papco, J., Godova, D., Zvara, I., Nogova, E., Ondrasova, L. 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 49, 2019, p. 479-496.
100. Paul, M. D. Surveying and 3D Modeling of a Natural Underground Cavity. Nandru Cave, Hunedoara County. Recent Advances in Geodesy and Geomatics Engineering, 2013, p. 206-211.
101. Peneva, E., Gospodinov, S., Lambeva, T., Penev, P. Some Aspects on Basic Gravimetric Network Adjustment. FIG Working Week: From Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World. Sofia, 2015.
102. Pivetta, T., Braitenberg, C., Gabrovsek, F., Gabriel, G., Meurers, B. Gravimetry and hydrologic data to constrain the hydrodynamics of a karstic area: The Skocjan Caves study case. Journal of Hydrology 629, 2024.
103. Powers, D. W., Owsley, D. Field Survey of Evaporate Karst along New Mexico Highway 128 Realignment Routes. Oklahoma Geological Survey Circular 109, 2003.
104. Qiao, Z., Zhang, J., Yuan, P., Li, L., Hu, R., Yang, H., Weng, K., Zhang, Z., Wang, L., Qin, P., Hao, L., Yang, C., Lv, X., Wu, B., Wang, X., Lin, Q. Application of gravity gradient measurement in the detection of urban underground space. Journal of Applied Geophysics 237, 2025
105. Reci, H., Tsokas, G. N., Papazachos, C., Bushati, S. Conversion of Bouguer Gravity Data to Depth, Dip and Density Contrast with Complex Attributes

- Analysis Technique in the Area of Greece. Romanian Reports in Physics, 2011, p. 203-320.
106. Ryabakov, M., Goldschmidt, V., Fleischer, L., Rotstein, Y. Cave Detection and 4-D monitoring: A Microgravity Case History Near the Dead Sea. The Leading Edge, 2001, p. 896-900.
107. Saddek, B., Chemseddine, F., Djamel, B. Application of Microgravimetry to Assessing Collapse Risk in Carbonate Sinkhole Areas, Cheria Basin, Northeast of Algeria. Journal of Life Sciences 11, 2017, p. 232-248
108. Saibi, H., Amrouche, M., Fowler, A. Deep Cavity Systems Detection in Al-Ain City, UAE, Based on Gravity Surveys Inversion. Journal of Asian Earth Sciences 182, 2019.
109. Scheirer, D. S., Aboud, E. Preliminary Gravity and Ground Magnetic Data in the Arbuckle Uplift near Sulphur, Oklahoma. USGS, 2008.
110. Schulte, P., Crocker-Bedford, K. Karst and Caves of Southeast Alaska. UAS Ketchikan Campus and Cultural Heritage Research, 1998.
111. Seigel, H. O., Nind, C. J., Milanovic, A., MacQueen, J. Results from Initial Field Trials of a Borehole Gravity Meter for Mining and Geotechnical Applications. Results from Initial Field Trials of a Borehole Gravity Meter for Mining and Geotechnical Applications, Swaizland , 2009, p. 92-96.
112. Seigel, H. O., Nind, C., Lachapelle, R., Chouteau, M., & Giroux, B. Development of a Borehole Gravity Meter for Mining Applications. Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007, p. 1143-1147.
113. Sauro, F. Deep under the Earth's surface, discovering beauty and science. 2015.
http://www.ted.com/talks/francesco_sauro_deep_under_the_earth_s_surface_discovering_beauty_and_science?utm_campaign=social&utm_medium=referral&utm_source=facebook.com&utm_content=talk&utm_term=science#t-171198
114. Siegel, H. O. A Guide to High Precision Land Gravimeter Surveys. Concord, Ontario, 1995.
115. Slavova, T. V. Modern Methods and Devices for Mapping Underground Galleries and Natural Caves. IV International Conference on Cartography and GIS, 1. Albena, 2012, p. 277-284.
116. Slavova, T., Rusev, A. Practical Geophysical Methods of Cave Detection. CREG Journal 103, September 2018, p. 18-21.

117. Slavova T., Rusev A. Multi-sensor Cave Detection. GIM International Magazine, Vol. 3, 2016, p. 24-27
118. Slavova, T., Rusev, A., Kamburov, A. Spatial Cave Mapping in Bulgaria : Modern Methods and Devices. GIM International, Vol. 3, 2013, p. 33-35.
119. Slavova T. Modern Methods and Devices for Mapping Underground Calleries and Natural Caves, IV International Conference on Cartography and GIS (Vol.1), June, 18-22, 2012, Albena, Bulgaria, p. 277-284, ISSN 1314-0604.
120. Strelan, A. H. Going Deep: A System Concept for Detecting Deeply Buried Facilities from Space. 2003.
121. Touthmalani, R. Application of Gravity Method in Fault Path Detection. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, p. 6450-6460.
122. Wahr, J. Geodesy and Gravity. Golden, Colorado, 1999.
123. Waltham, A. C., Fookes, P. G. Engineering Classification of Karst Ground Conditions. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2003, p. 101-118.
124. Williams, P. W. Karst in UNESCO World Heritage Sites. Karst Management, 2011, p. 459-480.
125. Wilson, C. R., Scanlon, B., Sharp, J., Longuevergne, L., Wu, H. Field Test of the Superconducting Gravimeter as a Hydrolic Sensor. Ground Water, 2012, p. 442-449.
126. Xeidakis, G. S., Torok, A., Skias, A., Kleb, B. Engineering Geological Problems Associated with Karst Terrains: Their Investigations, Monitoring, and Mitigation and Design of Engineering Structures on Karst Terrains. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXVI : Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, 2004, p. 1932-1941.

Таня Славова

ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ДЪЛБОЧИННО РАЗПОЛОЖЕНИ КУХИНИ,
ПОСРЕДСТВОМ ГРАВИМЕТРИЧНИ МЕТОДИ

София, 2026 г.