

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“
ГЕОЛОГОПРОУЧВАТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ
Катедра „Приложна геофизика“

инж. ХРИСТИЯН ВЕСЕЛИНОВ ЦАНКОВ

**РАЗРАБОТВАНЕ НА
АЛГОРИТМИ, ПРОГРАМИ И МЕТОДИКА
ЗА МОДЕЛИРАНЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
НА ГРАВИТАЦИОННИ АНОМАЛИИ
В ИНТЕРАКТИВЕН РЕЖИМ**

**АВТОРЕФЕРАТ
на
ДИСЕРТАЦИЯ**

За присъждане на образователна и научна степен „ДОКТОР“
Професионално направление 4.4. Науки за Земята
Научна специалност „Методи и техника на геоложките изследвания“

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ
проф. д-р РАДИ ГЕОРГИЕВ РАДИЧЕВ

С о ф и я
2013

Дисертационният труд се състои от въведение, три глави и заключение, изложени на 193 страници. В текстовото изложение на работата са представени 76 илюстрации, 17 таблици и 207 формули, както и списък с литература, включващ 283 заглавия.

В първа глава се съдържа обобщен анализ на методите за решаване на правата и обратната гравиметрични задачи. Дадено е и кратко методическо описание на етапите на обработка и интерпретация на гравиметрични данни. Създадените алгоритми и програми, както и свързаните с тях геометрични модели, включени в разработената **Система за Моделиране и Интерпретация на Гравитационни Аномалии (СИМИНГРАН)** са разгледани подробно в първите две части на втора глава. В последната част на главата е оценена ефективността на системата на базата на приложението ѝ за решаване на правата и обратната гравиметрични задачи за разнообразни синтетични моделни аномалии. В трета глава на дисертацията е направена интерпретация на реални гравитационни аномалии от района на гр. Провадия, чрез многовариантно моделиране и смесена (интерактивна/автоматизирана) оптимизация с помощта на разработената система *СИМИНГРАН*.

Номерацията на главите в Автореферата съответства на тази в дисертацията. Фигурите, таблиците и формулите от Автореферата са със собствена номерация.

Дисертационният труд е разгледан на разширен катедрен съвет и предложен за разглеждане от специализирано жури в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София.

Докторантът Християн Веселинов Цанков е преподавател-асистент в катедра „Приложна геофизика“ при МГУ „Св. Иван Рилски“.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред жури на в зала на МГУ „Св. Иван Рилски“.

Материалите по защитата на дисертационния труд са предоставени за ползване в канцеларията на „Комплексен център за обучение и квалификация на МГУ „Св. Иван Рилски“ София.

Адрес: София 1700
Студентски град, ул. „Проф. Боян Каменов“ 1
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“

Отпечатване

Благодарности

Бих искал да изразя дълбока и най-искрена благодарност на своя научен ръководител проф. д-р Ради Радичев за отделеното време и внимание, ценните забележки и конструктивните дискусии свързани с въпроси, засягащи настоящия дисертационен труд. Благодарен съм и за оказваното съдействие по най-разнообразни тематики от научно и практическо естество от областта на геофизиката като цяло.

Изказвам специални благодарности за професионалната подкрепа, креативните консултации и предоставените материали на проф. д-р Петър Ставрев и проф. д-р Стефан Димовски, както и на всички колеги от катедра Приложна геофизика към МГУ „Св. Иван Рилски“ София, които по един или друг начин съдействаха за реализацията на настоящата работа.

За съжаление не мога да изкажа своите лични благодарности към покойните вече проф. д-р Вера Иванова и д-р Стоян Авдев, които през различни етапи от моето обучение и работа оказаха ползотворно влияние върху професионалното ми израстване в областта на науката и геофизиката.

Запазвам края, за да благодаря на моята съпруга Любомира и синът ми Максимилиан, които изтърпяха цялото творческото напрежение и ангажираност, с които бе свързано написването на настоящата работа. Тяхната любов и подкрепа през последните години бяха безценна опора за мен.

От автора

1. Въведение

Гравипроучването е един от най-старите методи на приложната геофизика. Той се основава на онези изменения по място на силата на тежестта, които се дължат само на гравитационното влияние на плътностните нееднородности на скалите в земната кора.

Измерените стойности на силата на тежестта зависят от гравитационното влияние на цялата маса на Земята, от центробежната сила на нейното въртене и от разстоянието на точките на измерване от центъра на земното кълбо, но са повлияни и от особеностите в разпределението на масата, т.е. от плътностните различия на скалите и от неравностите на земната повърхнина (Димитров, 1976).

В основата на метода е залегнала идеята, че по гравитационната аномалия на даден смутител, въз основа на методите на математичната физика може да се намерят някои от неговите основни параметри, т.е. да се реши обратната задача на гравипроучването. За да се избегне многозначността на решението, трябва да се изучи плътността на скалите в изследвания участък и да се привлече всяка подходяща допълнителна информация.

1.1. Актуалност на темата

Гравипроучването има широко приложение в геологията за изясняване дълбочинния строеж на земната кора, при търсене и проучване на нефтени, газови, въглищни и рудни находища. В минната промишленост гравитационния метод често се прилага за определяне на геоложките особености на разреза в дълбочина, както и за директно изчисляване количеството на резервите за някои масивни рудни тела. Гравипроучването е и първият геофизичен метод използван в нефтената и газова индустрия и въпреки, че с развитието на сеизмичните методи постепенно е изместен от съвременния търсещо-проучвателен комплекс, той продължава да е важен, а понякога и решаващ за редица изследвани площи. В нефтеното проучване гравитационният метод е приложим практически в солни провинции, навлачни и предпланински пояси, неизследвани водни басейни и обекти, намиращи се под зони с повишени скорости на разпространение на сеизмичните вълни. Има и известно развитие в използването на метода при специални проучвания за плитки обекти (Nabighian, et al., 2005).

Данните за силата на тежестта по земната повърхност се използват в геодезията за определяне на реалната форма на Земята, която се характеризира със свиването на земния елипсоид, с отклонението на геоида от елипсоида и височината на физическата повърхнина на Земята над геоида. За да се използват за целите на геологията, тези данни трябва да се редуцират така, че в тях да остане само влиянието на разликите в плътността на скалите в земната кора, т.е. да се намерят аномалиите на силата на тежестта (Димитров, 1976).

В последните 60 г. са направени фундаментални открития в областта на теорията на гравиметричните данни. Основно значение за повишаване ефективността при интерпретация на потенциални полета имат теорията и методите за приближени решения на некоректно поставени задачи. Постановката и методите на тази теория са заложили в началото на 60-те години от А. Н. Тихонов, М. М. Лаврентиев, М. К. Иванов и В. Н. Страхов.

Процесът на количествена интерпретация на гравиметричните данни се възприема като единна взаимосвързана последователност от комплексни процедури обединени от една обща цел (Голдшмидт, 1984). Той може да бъде онагледен чрез разбиването му на три подсистеми:

- количествено изучаване структурата на полето с помощта на статистически и детерминистични методи;
- итерационно моделиране (решаване на прави и обратни задачи);

- съдържателно осмисляне и тълкуване на геофизичните аномалии чрез методите на разпознаване на образи.

Доколкото основната цел на количествената интерпретация при тълкуване на геофизичните полета се състои в построяване на съдържателни обемни модели, то за нейния основен проблем се счита оптимизацията на решението на правата и обратна задача (Мудрецовой, 1981).

Значителни резултати са получени и в областта на решението на обратните некоректни по Адамар гравиметрични задачи. Практиката при решаване на подобни задачи показва, че те имат физически смисъл. В. Н. Страхов нарича тези задачи условно-коректни (Страхов, 1976). За тях М. М. Лаврентиев, В. И. Старостенко въвежда понятието коректност по Тихонов. Построяването на множеството на коректност се осъществява с помощта на методите за решаване на некоректни по Адамар задачи основани на принципите на регуляризацията (Страхов, 1976; Старостенко, 1978; Гласко, 1984; Тихонов & Арсенин, 1986).

Интерпретаторите на гравиметрични данни в днешно време са в състояние да се възползват пълноценно от създадените алгоритми и подобренията свързани със събирането и обработката на данни, осигурени чрез свободния достъп до десетки работни станции и персонални компютри. Всъщност, фундаментът на който стои съвременната интерпретация е същия като преди 30 години, но развитието на GPS навигацията и малките, но мощни компютри допринесоха до революция в бързодействието и полезността на гравитационния метод. При наличие на подходящ софтуер и лаптоп свързан с гравиметричната апаратура данните могат да бъдат събирани и дори обработени и интерпретирани по време на самите полеви работи. В днешно време информацията събрана по време на измерванията може да бъде изпратена към сателит, а от там препратена за съхранение към сървър за данни, достъпът до който може да бъде осъществен през глобалната мрежа (Nabighian, et al., 2005).

1.2. Цели и задачи на изследването

Целта на настоящия дисертационен труд е разработката на алгоритми и програми за интерпретация на гравитационни аномалии чрез осигуряване на възможност за максималното използване на допълнителна информация за решението на задачите. Водеща идея в разработката е организирането на създадените алгоритми и програми в единна система за решаване на правата и обратна гравиметрична задача. Друга важна задача е прилагането на разработената система за реални гравиметрични аномалии от района на гр. Провадия. Постигането на поставената цел е свързано с решаването на следните основни задачи:

- Теоретично и моделно изследване на свойствата на някои алгоритми за решаване на правата и обратна гравиметрична задача;
- Разработване на пакет от алгоритми и компютърни програми за решаване на правата и обратната гравиметрична задача за двумерни и триизмерни геометрични тела с различна степен на сложност на формите;
- Построяване на регуляризираци оператори за разработените модели на тела;
- Създаване на процедура (алгоритъм) за интерактивно въздействие от страна на интерпретатора върху оптимизирания гравиметричен модел;
- Изследване и оценка на ефективността на разработените програми и алгоритми за решаване на правата и обратна гравиметрична задача;
- Интерпретация на гравитационните аномалии с използване на цялата налична допълнителна информация при изучаване на солни тела на територията на Провадийската депресия по геофизични данни.

Глава I. МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА ГРАВИТАЦИОННИ АНОМАЛИИ

В тази глава се прави подробен преглед на проблемите свързани с решаването на правата и обратната гравиметрични задачи. В афтореферата е отразена само кратката обща постановка на задачите.

2. Права гравиметрична задача

Правата гравиметрична задача е една от основните задачи в гравипроучването. При нейното решаване са известни положението, формата, размерите и плътностните свойства на смущаващите тела, а се търси аномалното гравитационно поле, създадено от тези тела в една или множество точки на пространството по земната повърхност или над нея, в подземни минни изработки, по оста на сондажни отвори и др. (Ставрев & Радичев, 1984b). Следователно правата задача се свежда до изчисляване на геофизичните аномалии за определен физико-геоложки модел. Тя има еднозначно решение, т.е. решението ѝ е точно определено и единствено, което се предопределя от постоянството на геофизичните и геометричните параметри на модела (Добрев, Иванова & Радков, 1989).

Правата гравиметрична задача има съществено значение в етапа на геолого-геофизичната интерпретация на резултатите от изследванията, където тя се решава като методически елемент от процеса на решаване на обратната гравиметрична задача. Тя намира широко приложение и в етапа на проектиране на геофизичните изследвания за определяне точността и гъстотата на търсещо-проучвателните гравиметрични снимки. Многовариантните решения на правата задача съществено допринасят и за оценка на геоложката и икономическата ефективност на проведените геофизични изследвания (Добрев, Иванова & Радков, 1989).

2.1. Обща постановка на правата гравиметрична задача

Правата гравиметрична задача се състои в намиране стойностите на елементите на гравитационното поле по дадено разпределение на неговите източници. Това определение има доста широк смисъл, включващо намирането на всевъзможни функционали на гравитационното поле по дадените източници (Страхов, Лапина & Кузнецова, 1978).

Общият вид на решението на правата гравиметрична задача за триизмерни тела се дава чрез интегралния израз на потенциала (Димитров, 1976; Голиздра, 1977; Мудрецовой, 1981; Делинджер, 1982; Блох, 1998 и др.):

$$V(x, y, z) = G \iiint_T \frac{\rho(x_0, y_0, z_0)}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{3/2}} d\tau, \quad \{1.1\}$$

неговите първи ($V_z(x, y, z)$), втори ($V_{xz}(x, y, z)$, $V_{yz}(x, y, z)$, $V_{xy}(x, y, z)$, $V_{zx}(x, y, z)$, $V_{\Delta}(x, y, z)$), и трети ($V_{zzz}(x, y, z)$) производни или чрез уравнението за двумерни тела:

$$V(x, z) = 2G \iint_S \ln \frac{\rho(x_0, z_0)}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}} ds, \quad \{1.2\}$$

и съответните производни $V_z(x, z)$, $V_{xz}(x, z)$, $V_{zz}(x, z)$, $V_{zzz}(x, z)$.

В горните изрази G е универсалната гравитационна константа, която в системата SI е равна на $6,67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, ρ – масовата плътност на елементарен обем τ от тялото с координати x_0, y_0, z_0 , а изразът в знаменателя представлява разстоянието от елементарния обем до точката на наблюдение с координати $P(x, y, z)$.

Общата постановка на правата задача във формален вид е следната. По предварително известни геолого-геофизични данни се построява предварителен модел на изследвания обект описван с параметрите $p_j, j = 1, m$. Необходимо е описанието на модела да е оптимално, т.е. параметрите трябва да са подбрани така, че при решаването на задачата да не бъдат пропуснати особености, които биха се проявили при бъдещите или проведените гравиметрични наблюдения (Страхов & Лучицкий, 1980; Добрев, Иванова & Радков, 1989; Яновская & Прохорова, 2004). Характерът на параметрите p зависи от типа задача, формата на експерименталните тела, с които се апроксимират реалните геоложки обекти, закона на изменение на плътността и др.

Математически, правата задача може да бъде сведена до решаване на операторното уравнение

$$\Phi p = d, \quad (1.3)$$

където p – вектор на параметрическото пространство P ; Φ – нелинеен (общ случай) оператор на решението на правата задача (изображение на пространството P в пространството D); d – търсената стойност (полето), $d \in D$.

Аналитичното представяне на гравитационният потенциал и неговите производни може да бъде извършено по различни начини (Ставрев, 2009). Например във вид на кратен интеграл, в ред по обратната степен на разстоянието или чрез Фурие преобразуване (Голиздра, 1977; Мудрецово, 1981; Пашко & Старостенко, 1982). В двумерния случай съставляващите на силата на тежестта и техните производни могат да бъдат разглеждани като действителна и имагинерна част на аналитичните функции (Голиздра, 1977; Мудрецово, 1981) и др. Използвайки теоремата на Гаус-Остроградски и Стокс могат да се получат удобни изрази за компонентите на полето с интеграли от по ниска степен.

Решението на правата гравиметрична задача се използва широко при обработката и интерпретацията на данни като в днешно време, принципни проблеми за нейното решение не съществуват. За един достатъчно широк диапазон от изходни данни е установена класическа коректност (по Ж. Адамар) за решаваните задачи, а основният проблем се свежда до построяване на съответните технологични системи, алгоритми и програми.

3. Обратна гравиметрична задача

Решаването на обратната гравиметрична задача за определяне параметрите на отделни тела, на групи от тела или на цялостния модел е завършващ етап в интерпретацията на гравиметричните данни. Тези параметри представляват количествените данни за разпределението на аномалните маси, характеризиращи тяхната форма, големина, дълбочина, наклон и т.н. Трябва да се има пред вид, че едно формално решение, вярно от математична гледна точка, може да няма физико-геоложки смисъл, т.е. да не отговаря на реалния геоложки строеж на проучваната площ. То не може да се приеме за реално решение на обратната задача (Димитров, 1976).

Обратната задача може да се реши с преки и непреки методи. Преки методи са тези, при които с използване на правила и формули от аномалията направо се намират някои от характерните параметри на смущаващия обект като например дълбочината и ефективната му маса. При непреките методи се изхожда от получените чрез преките методи данни, за да се

даде едно изходно вероятно разположение на смущаващите маси, което по-нататък се уточнява чрез сравняване на тяхното гравитационно поле с наблюдаваната аномалия по методите на подбора и на последователните приближения.

Два са основните методи за решаване на обратните гравиметрични задачи в днешно време: методът на подбора и методът на регуляризацията. Освен тях, предмет на изследвания и приложение в практиката представляват и комбинираните подходи към решаването на тези задачи. Един такъв пример е методът на регуляризирания подбор. Редица автори разширяват възможностите за решаване на обратната задача чрез определяне на функционални плътностно-дълбочинни зависимости или чрез налагане на различни пространствени ограничения (Шалаев, 1972; Булах, Ржаницын & Маркова, 1976; Кравцов & Сегалович, 1976; Страхов & Лапина, 1976; Старостенко & Оганесян, 1977; Pedersen L. B., 1977; Старостенко, 1978; Булах, Маркова, Тимошенко & Бойко, 1984; Chai & Hinze, 1988; Reamer & Ferguson, 1989; Guspi, 1992; Ставрев, 1996; Barbosa, Silva & Medeiros, 1997 и др.).

3.1. Обща постановка на обратната гравиметрична задача

Решаването на обратната гравиметрична задача се състои в откриването на разпределението на масите по данни за гравитационното поле на същите маси. Аналитично задачата се състои в решаване на интегралните уравнения {1.1} и {1.2}, които дават връзката между наблюдаваната аномалия и неизвестното разпределение на създаващите я смутители. Поставена по този начин, обратната гравиметрична е многозначна, т.е. съществуват множество разпределения на масите, създаващи едно и също гравитационно поле. Друга особеност на решението на тази задача е неговата неустойчивост, т.е. за достатъчно малки отклонения на измереното поле, попадащи в границите на точността на неговото определяне, са възможни значителни изменения в разпределението на масите. Поради тези причини обратната гравиметрична задача принадлежи към некоректно поставените задачи.

Като основа за развитието на съвременните методи за решаване на некоректните задачи служи формулирания от А. Н. Тихонов общ принцип на регуляризацията (Тихонов, 1963а; 1963б; Тихонов & Арсенин, 1986), съгласно който при решаването на некоректно поставените задачи е необходимо да се прилагат специални методи, основаващи се на привличането на допълнителна информация за свойствата и особеностите на търсеното решение и грешката във входните данни.

При решаването на обратната гравиметрична задача се налага да се прибегва към пресмятане, както на линейни, така и на нелинейни интегрални уравнения. В линейния вариант обикновено се задава някаква форма на телата, най-често във вид на еквивалентен слой като с изразите се пресмята относителното разпределение на плътностите в този слой, така че да се получи съвпадение с изходните данни. При нелинейния случай за известна се приема ефективната плътност, при което с решаване на уравнението се намира формата на източника.

Най-труден и изключително важен момент при определяне точността и надеждността на геоложката интерпретация на резултатите от анализа на гравиметричните данни е изборът на подходящ клас на решението, т.е. изборът на физико-геоложки модел, в рамките на който се решава обратната задача. Всяка интерпретация на гравиметрични данни е пряко свързана с определено моделно представяне (Мудрецовой, 1981). Грешката в тълкуването на резултатите зависи главно от избора на модели на полето и на средата, представящи реалния геоложки разрез. Принципът за моделност е в пряка връзка с нееднозначността и неустойчивостта на решението на обратната гравиметрична задача.

Изборът на геолого-геофизичните модели се основава на привлечената априорна информация и опитът на интерпретатора. Математическото описание на реалния геолого-геофизичен модел на средата е практически невъзможно, поради което е необходимо да се извърши целесъобразна апроксимация на реалните геоложки модели с опростени такива. Водещи при интерпретацията на гравитационните данни се явяват фундаменталните идеи на апроксимацията и оптимизацията (Мудрецовой, 1981). Тези идеи са основни при решаването на правите задачи. Това позволява значителното намаляване на сложността на реалните модели, което води до съществено редуциране на необходимото апаратурно време за изчисляване на правите задачи и създаването на достатъчно перспективни методи за решаване на обратните задачи.

Класификацията на математическите модели може да се осъществи на базата на различни принципи. По степента на пълнота на априорната информация моделите се делят на оптимални, състоятелни и несъстоятелни. По характера на аналитичното описание на полето, източниците и връзките между тях се отделят детерминистични (Страхов, 1976; Старостенко, 1978; Тихонов & Арсенин, 1986; Тархов, Зондаренко & Никитин, 1982), статистически (Гольцман, 1971; Тархов, Зондаренко & Никитин, 1982) и смесени (Гольцман, 1971; Тихонов & Арсенин, 1986; Мудрецовой, 1981) модели. По степента на съответствие на моделното разпределение на масите с реални геоложки модели на адекватни, еквивалентни и смесени (Мудрецовой, 1981).

В съответствие с принципите за моделност, решението на обратната задача предшества построяването на началния плътностен модел, с помощта на който се апроксимира геоложкия строеж на изследвания район. Гравитационното влияние в точката на наблюдение $(x_i, z_i), i = 1, M$ на създадения модел в двумерния случай се представя с помощта на съотношението (Старостенко & Заворотъко, 1976; Мудрецовой, 1981):

$$\sum_{j=1}^N \rho_j g_{ij} (x_i, z_i, P_{1j}, \dots, P_{nj}, P'_{1j}, \dots, P'_{kj}) = V_{zT} (x_i, z_i), \quad (1.4)$$

където N – количеството елементарни тела; ρ_j – плътност на j -тото тяло; $P_{1j}, \dots, P_{nj}, P'_{1j}, \dots, P'_{kj}$ – параметри на j -тото тяло; g_{ij} – гравитационно влияние на j -тото тяло с плътност равна на единица в i -тата наблюдателна точка (нелинейна функция на координатите на точките и параметрите на телата); M – брой наблюдателни точки.

Параметрите на изходния модел се определят от условието за съвпадение на теоретичното $V_{zT}(x_i, z_i)$ и наблюдаваното $V_{zH}(x_i, z_i)$ поле посредством системата от уравнения:

$$\sum_{j=1}^N \rho_j g_{ij} (x_i, z_i, P_{1j}, \dots, P_{nj}, P'_{1j}, \dots, P'_{kj}) = V_{zH} (x_i, z_i). \quad (1.5)$$

Решаването на обратната гравиметрична задача в дадения моделен клас се свежда до решението на тази система от уравнения.

Системата {1.5} може да бъде представена и във вид на нелинейно операторно уравнение от първи род {1.3}.

В днешно време са разработени множество методи за решаване на обратната гравиметрична задача. Класифицирането на тези методи може да бъде извършено по различни начини и критерии (Мудрецовой, 1981; Трошков & Грознова, 1983) и др. По вида на използвания математически модел е подходящо методите за интерпретация да бъдат разделени на две основни групи (Трошков & Грознова, 1983): класически методи, в основата на които стои идеализиран модел на физико-геоложката среда и функционално-аналитически,

които се основават на модели, съдържащи установени елементи на полето и техните фундаментални свойства. Методите за решаване на обратните задачи могат да бъдат обединени и по техните особености: областта, в която е зададена потенциалната функция; съотношението между определяната и случайната компонента в интерпретираното поле; по критерии за съответствие между измереното и моделното поле; сложността на аномалното поле и др.

4. Етапи на интерпретацията на аномалното гравитационно поле

Интерпретацията на аномалиите на силата на тежестта е завършващ етап в гравипроучването. Изучаването на пространствените вариации на тези аномалии дава възможност за извличане на важна информация относно плътностните нееднородности на различни дълбочини в горния литосферен слой на Земята. Решаването на интерпретационните задачи в заключителния етап на гравипроучването среща съществени усложнения, произтичащи от сумарния и значително отслабващ с разстоянията наблюдаван ефект от плътностните нееднородности. Основните теоретични и методични проблеми на интерпретацията са свързани с осигуряването на коректна постановка на обратните задачи и на ефективни методи обединени в цялостни технологии за получаване на практически значими решения в реалните условия на проучвателните снимки.

Интерпретацията на гравитационните аномалии за решаване на геоложки задачи е процес, преминаващ през няколко основни етапа:

1. Събиране и систематизиране на цялата налична геоложка и геофизична информация за изучаваното геолошко пространство, определяне характера на допълнителната информация, която може да се получи при интерпретацията на данните от гравиметричната снимка;
2. Анализ и преобразуване на аномалното поле, свързване на отделените аномалии и аномални зони с проявата на известни или предполагаеми геоложки структури;
3. Съставяне на качествен физико-геоложки модел на изучаваното пространство въз основа на преки данни и на оценки за положението и разпространението на отличаващите се по плътност елементи на геоложкия строеж;
4. Построяване на количествен физико-геометричен модел на плътностните нееднородности, което изисква избор на подходяща апроксимация и съответна параметризация на смущаващите тела, оценка на техните параметри и формиране на първо приближение;
5. Решаване на обратни задачи за определяне параметрите на отделни тела, на групи от тела или на цялостния модел въз основа на оценки за възможността да се получат еднозначни и устойчиви решения, оптимизиране на модела в съгласие с наличните преки данни или предположения за смущаващите тела, оценка на качеството на резултатите;
6. Геолошко осмисляне на геофизичните решения.

Първият етап е подготвителен, вторият и третият се определят като етапи на качествената интерпретация, а четвъртият и петият – на количествената интерпретация. Шестият е заключителният етап на геоложка интерпретация на геофизичните резултати (Ставрев, 1996).

Разделянето на интерпретацията на качествена и количествена зависи от нейната задълбоченост по отношение на изучаването и изследването на гравитационните аномалии и предизвикващите ги геоложки обекти. При качествената интерпретация се търсят някои общи

изводи за смущаващото тяло като например: приблизителна форма, пространствено положение, посока на разпространение, дълбочинност, стръмнина на неговите граници. Тези изводи се правят по формата и разположението на аномалията, площното ѝ разпространение, големината на хоризонталния градиент на полето. Понякога при възможност в подкрепа на качествената интерпретация могат да се потърсят и някои лесно намиращи се съгласно елементарни практически правила приблизителни ориентировъчни параметри. Разбира се, крайната цел на гравипроучването е количествената интерпретация, при която се търси възможното най-пълно изясняване на разпределението на смущаващите маси.

При метода на подбора, който се използва, както при графичното, така и при численото решаване на обратната задача, сравняването на наблюдаваната аномална крива на полето на естествения смутител $\Delta g(x)$ с изчислената аномална крива $F(x)$ на моделния смутител, с който се отъждествява, трябва да бъде обективно като се използва някой от известните в математиката критерии. Ако двете аномални криви се съпоставят в n броя точки на интерпретационния профил, най-доброто приближение на кривата $F(x)$ до кривата $\Delta g(x)$ се постига при

$$\sum_{i=1}^n [\Delta g(x_i) - F(x_i)]^2 = \min. \quad (1.6)$$

Въз основа на тази връзка може да се определят параметрите на такъв моделен смутител, който най-добре се покрива с естествения смутител. Тези параметри, при които се получава най-добра близост на кривите $F(x)$ и $\Delta g(x)$, се определят чрез методите на минимизация.

Винаги трябва да се има пред вид, че при геоложката интерпретация на аномалиите на силата на тежестта е нужна широка информация за физико-геоложките условия в проучвания участък: плътност на скалите, вероятна форма и дълбочина на смущаващите маси. Само при съобразяване на тези условия може да се стигне до правдоподобно решаване на обратната задача.

5. Бъдещето на гравитационните методи в геофизиката

Обработването и изчисляването на данните от гравиметричните измервания ще продължи да мигрира към широко използваните Windows™ и Linux™ базирани платформи. Ефективното управление на базите данни ще получава все по-голямо значение като програмите за извличане на необходимата и полезна информация ще стават все по-удобни за ползване. Бързият достъп до данни от отдалечени наземни, морски, сателитни и др. изследвания ще се усъвършенства като интерпретаторите ще получават ефективно резултати в реално време. Интерпретацията с помощта на детайлни и реалистични триизмерни бързодействащи системи ще стане все по-често срещана практика. Комплексирането с други геофизични методи ще намира все по-широко практическо приложение (Nabighian, et al., 2005).

Глава II. РАЗРАБОТВАНЕ НА АЛГОРИТМИ, ПРОГРАМИ И МЕТОДИКА ЗА МОДЕЛИРАНЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА ГРАВИТАЦИОННИ АНОМАЛИИ В ИНТЕРАКТИВЕН РЕЖИМ (Автоматизирана система *СИМИНГРАН v0.5.1*)

6. Описание на алгоритмите и програмите за моделиране и интерпретация на гравитационни аномалии в интерактивен режим

От особена важност за решаването на правата задача, която е елемент от алгоритъма за решаване на обратната задача е създаването на гъвкави, разнообразни модели, които в зависимост от поставените геоложки задачи биха апроксимирали достатъчно добре реалната геоложка среда. За целта в програмния пакет са включени алгоритми за решаване на редица известни от литературата гравиметрични модели (Talwani & Ewing, 1960; Nagy, 1966; Hjelt, 1972b; Димитров, 1976; Cady, 1980; Ставрев & Радичев, 1984; Emerson, Clark & Saul, 1985; Clark, Saul & Emerson, 1986; Kim, 1987; Радичев, 1988; Ставрев & Радичев, 1989; Ставрев, 1996 и др.).

Ефективното използване на изчислителната техника съвместно със съвременни програмни продукти и/или собствен код за решаване на задачата е от голямо значение за постигането на добри резултати при интерпретацията на геофизичните данни. Изчислителната сложност на задачата може да бъде редуцирана с избора на подходяща апроксимация на смущаващите тела така, че те да се описват достатъчно точно с неголям брой параметри при проста връзка между параметрите и аномалното поле (Ставрев & Радичев, 1989).

Всички разработени програми и алгоритми включени в пакета програми за моделиране и интерпретация на гравиметрични аномалии, под общото название *СИМИНГРАН (СИстема за Моделиране и ИНтерпретация на ГРАвитационни АНОмалии)* или *SYMINGRAN (SYstem for Modelling and INterpretation of GRAvity ANomalies)*, са написани на програмния език MATLAB, включващ редица интегрирани функции за изчисляване, анализиране и визуализация на данни. Поради тази причина следва кратко описание на средата за програмиране MATLAB.

6.1. Кратко описание на програмната система MATLAB

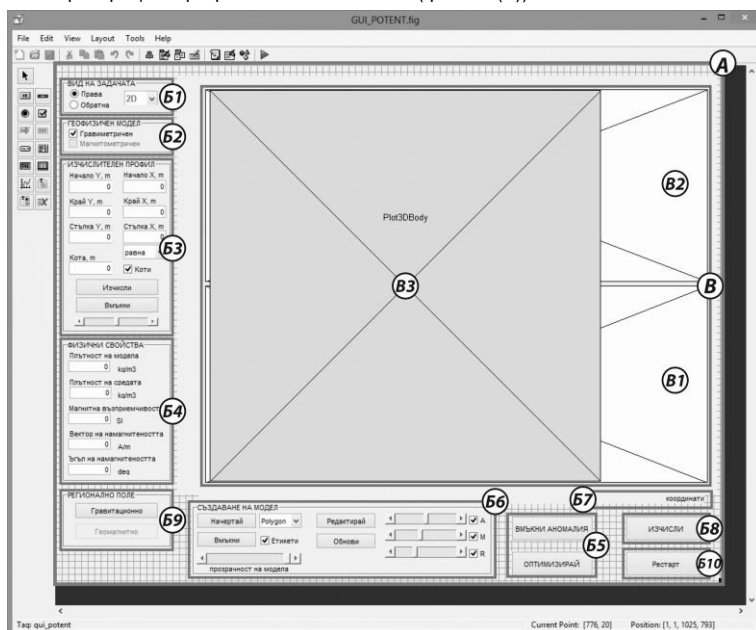
MATLAB е широко разпространена програмна система, изключително популярна сред инженери, изследователи, научни работници и специалисти във всички области на науката и техниката. Тя предлага огромни възможности за извършване на изчисления, аналитични преобразувания и висококачествено графично представяне на получените резултати. Гъвкава и адаптивна, благодарение на вградения програмен език от високо ниво, системата може да бъде приспособена към изискванията на всеки потребител чрез разработени от самия него приложни програмни инструменти. MATLAB е диалогова програмна система за научно-технически пресмятания и визуализация на получените резултатите. Тя интегрира в себе си възможности за аналитични преобразувания, числени пресмятания и графично представяне на получените резултати. Ориентирана е към работа с масиви от данни – вектори, матрици, многомерни масиви, масиви от клетки и масиви от записи.

Благодарение на практически неограничените възможности на системата, нейната гъвкавост и удобната за работа операционна среда, MATLAB е мощно средство за изчисления, анализи и оптимизация в най-различни области на познанието (Тончев Й. , 2007; 2008; 2009).

6.2. Графичен интерфейс на програмата СИМИНГРАН

Идеята за моделиране и интерпретация на гравитационни аномалии в интерактивен режим е осъществена чрез създаване на подходящ за тази цел графичен потребителски интерфейс (ГПИ) – Graphical user interface (GUI). Всички алгоритми и програми за решаване на правата и обратна гравиметрични задачи се изпълняват чрез програмиран достъп през съответните видими графични обекти на екрана на монитора с помощта на клавиатурата и мишката на компютъра.

В основата на създаването на графичния интерфейс на програмата СИМИНГРАН лежи дескрипторната графика на MATLAB. Най-високо положение в нейната йерархия има обектът *root*, който представлява екрана на монитора. Под него, обектът *figure* представлява графичния прозорец на програмата СИМИНГРАН (фиг. 2.1(A)).



Фигура 2.1. Външен вид на графичния интерфейс на СИМИНГРАН в графичната среда *guide* с номерация на отделните функционални елементи на програмата.

На следващото ниво в йерархията се разполагат обектите *axes*, представляващи координатните оси, в рамките на които се извеждат съответните графики (фиг. 2.1(B)). В програмата СИМИНГРАН обектите от този вид са 7 на брой и са активни в зависимост от актуалния режим на интерпретация. Те имат следните предназначения:

- В режим на решаване на права и обратна двумерна задача:

- PlotXZ – въвеждане, редактиране и визуализация на моделите и оптимизираните такива (B1);
- PlotDG – визуализация на моделната Δg_m , интерпретираната Δg и оптимизираната аномалия Δg_{opt} . (B2);
- В режим на решаване задачи в тримерното пространство (координатните системи са разположени една под друга подобно на слоеве (лейъри)):
 - Plot3DBody – въвеждане, редактиране и визуализация на моделите и оптимизираните такива (B3);
 - Plot3DRelief – визуализация на вмъкнати данни (гридове) за релефа;
 - PlotG3D_R – визуализация на разликовите аномалии;
 - PlotG3D – визуализация на моделните аномалии;
 - PlotG3D_A – визуализация на вмъкнатата интерпретирана аномалия.

Обектите от вида *uicontrol* представляват всички видове бутони, превключватели, списъци, флагове, плъзгачи, панели и текстови полета, които са групирани по функционалност от B1 до B10 във фиг. 2.1.

В програмата са вградени две контекстни менюта (*uicontextmenu*) активиращи съответните подпрограми. С помощта на първата се редактират параметрите на отделни тела в модела, а чрез другата се премахват единични тела от него.

На най-ниско ниво в йерархията се намират първичните „строителни“ елементи на програмата. Това са телата в модела изградени от линии, плоскости, повърхнини, контурите, изображенията и кривите на аномалиите, текстовите обозначения и т.н.

6.3. Описание и взаимовръзки между алгоритмите и програмите за решаване на правата и обратна гравиметрични задачи в системата СИМИНГРАН

Разработената ГПИ програма СИМИНГРАН е предназначена за решаване правата и обратната гравиметрични задачи в интерактивен режим. За тази цел в нея е интегриран пакет от двумерни (табл. 2.1) и триизмерни (табл. 2.2) гравиметрични модели, с помощта на които могат да бъдат създавани разнообразни комплексни физико-геоложки модели. Създаден е алгоритъм, позволяващ комбинирането на неограничен брой различни по сложност модели с разнообразна хомогенна плътност. Освен това програмата дава възможност за подбор и регуляризация на решаваните задачи чрез пряка намеса от интерпретатора във всеки един етап от създаването и/или оптимизирането на моделите.

Таблица 2.1. Интегрирани двумерни гравиметрични модели в програма СИМИНГРАН със съответните подпрограми и характерни свойства.

| № | Име на двумерния модел | Програма | Особености | Символ |
|-----|------------------------------|----------------|-----------------------|--------|
| 1 | Сфера | SpherGrav2D | симетрична | S |
| 2 | Хоризонтален кръгов цилиндър | CylHGrav2D | симетричен, безкраен | Ch |
| 3 | Вертикален кръгов цилиндър | CylVGrav2D | краен, безкраен | Cv |
| 4 | Вертикална материална линия | LineVGrav2D | крайна, безкрайна | Lv |
| 5 | Хоризонтална призма | PrismHGrav2D | крайна, безкрайна | Ph |
| 6.1 | Правоъгълен пласт | StratumHGrav2D | безкрайна | St |
| 6.2 | Вертикален праг | StratumHGrav2D | безкраен /ляв, десен/ | St |
| 7.1 | Наклонен пласт | StratumDGrav2D | безкраен | Sd |

| | | | | |
|-----|---------------------------------|----------------|-----------------------|----|
| 7.2 | Наклонен праг | StratumDGrav2D | безкраен /ляв, десен/ | Sd |
| 8 | Хоризонтален елиптичен цилиндър | EiCylHGrav2D | безкраен, наклонен | Eh |

Таблица 2.2. Интегрирани тримерни гравиметрични модели в програма СИМИНГРАН със съответните подпрограми и характерни свойства.

| № | Име на тримерния модел | Програма | Особености | Символ |
|-----|------------------------------|----------------|----------------------------|--------|
| 1 | Сфера | SpherGrav3D | - | S |
| 2 | Хоризонтален кръгов цилиндър | CylHGrav3D | краен, безкраен (завъртян) | Ch |
| 3 | Вертикален кръгов цилиндър | CylVGrav3D | краен, безкраен | Cv |
| 4 | Вертикална материална линия | LineVGrav3D | крайна, безкрайна | Lv |
| 5 | Хоризонтална призма | PrismHGrav3D | крайна, безкрайна | Ph |
| 6 | Вертикална призма | PrismVGrav3D | крайна | Pv |
| 7.1 | Наклонена призма | StratumDGrav3D | крайна, наклонена | Pd |
| 7.2 | Трапецойд | StratumDGrav3D | произволен | Tr |
| 8.1 | Триосен елипсоид | EllipsoGrav3D | завъртян, накл., усукан | Et |
| 8.2 | Удължен елипсоид | EllipsoGrav3D | завъртян, накл., усукан | Ep |
| 8.3 | Сплеснат елипсоид | EllipsoGrav3D | завъртян, накл., усукан | Eo |

Цялостната система СИМИНГРАН е компилирана в един изпълним .EXE файл с основна програма за управление GUI_POTENT.m. При компилирането на системата, освен 16^{те} подпрограми за решаване на правата гравиметрична задача за конкретните модели представени в табл. 2.1 и 2.2 и съответстващите им модификации за решаване на обратната задача, са включени още около 20 други авторски подпрограми, участващи по различен начин в процесите на моделиране, изчисляване, визуализиране и интерпретиране на гравиметричните данни.

6.3.1. Инициализация на програмния код

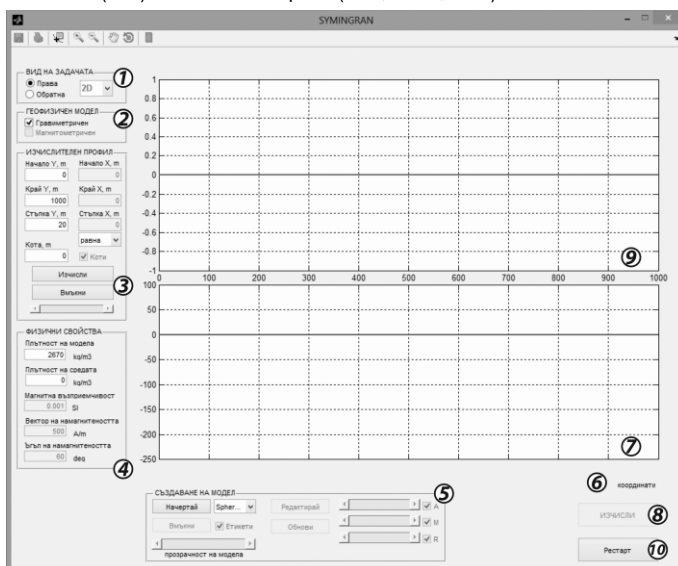
Организацията и изпълнението на програмния код е приоритет на базовата програма GUI_POTENT.m, която включва набор от автоматично генерирани и допълнително добавени подпрограми и функции, контролиращи останалите програми и подпрограми от изпълнимата програма SYMINGRAN.exe. Графичният потребителски интерфейс на GUI_POTENT.m се съхранява в изображението GUI_POTENT.fig, съдържащо всички обекти и техните първични свойства (фиг. 2.1(A)). Непосредствено след стартирането на пакета POTENT_Grav се извършва инициализация на програмния код. Това става чрез изпълнението на серия от стандартни проверки на обектите в ГПИ, при които информацията за тяхната начална структура се подава към вградената функция GUI_POTENT_OpeningFcn. Там отделните обекти от интерфейса се запамятват като структура от променливи, след което се превръщат към подфункцията initialize_gui, където се задават свойствата (название, стойности, начин на визуализация, цвят, активност и др.), с които те ще се характеризират в началния прозорец на програмата, който се визуализира след проверка и запамятване на актуализираната им структура. След дефиниране на началния вид на програмата инициализацията на кода продължава в подфункцията GUI_POTENT_OutputFcn чрез дефиниране на структурна променлива, съхраняваща данни за текущото състояние и съдържание на всички обекти в програмата, както и взаимовръзките между отделните йерархични нива.

6.3.2. Подпрограми и алгоритми за решаване на двумерна и тримерна права гравиметрична задача

Права двумерна задача

След избор на вида на решаваната задача, в конкретния случай „Права / 2D“ (фиг. 2.2(1)), се избира геофизичния модел, в рамките на който ще бъде решена тя. Тук настройката е фиксирана на „Гравиметричен“, тъй като възможността за решаване на магнитната задача не е разработена към момента.

Следващата стъпка е определяне на параметрите на изчислителния профил (фиг. 2.2(3)). Той се задава със своята начална и крайна точка, стъпка и kota в метри, след което се натиска бутонът „Изчисли“, който стартира подпрограмата *ProfileCALC*, с помощта на която се определят изчислителните точки и се преизчисляват координатните оси на физико-геоложкия модел (фиг. 2.2(6)) и координатната система, в която се изчислява съответстващата му аномалия (фиг. 2.2(9)). Ако е необходимо профилът, по който се решава правата задача да следва формата на релефа или да е с неравномерна стъпка изчислителните точки се импортират чрез бутона „Вмъкни“, свързан с подпрограмата *ProfileIMPORT*. За целта е необходимо предварително да бъде подготвен входен файл, съдържащ стойностите на *X* и *Z* в две колонки разделени с интервал или табулатор в обикновен текстови (*.txt) или табличен файл (*.xls, *.xlsx, *.dat).



Фигура 2.2. Външен вид на графичния интерфейс на СИМИНГРАН в режим на готовност за решаване на права двумерна задача непосредствено след инициализация на програмата.

Плътностните свойства на модела се задават в карето „ФИЗИЧНИ СВОЙСТВА“, където се записва плътността на телата в модела и тази на вместицата среда в g/cm^3 (фиг. 2.2(4)). В последствие тези параметри се възприемат от добавяните тела, но подлежат на редакция.

Обектите (сфери, призми, цилиндри, елипсоиди и др.), изграждащи гравиметричния модел се добавят от панела „СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ“ (фиг. 2.2(5)) след като от падащото меню се избере вида на геометричното тяло и се натисне бутона „Начертай“, активиращ подпрограмата *Source*. По този начин върху полето на координатната система (фиг. 2.2(7)) се изчертава контура на обекта, който подлежи на редакция с помощта на мишката. В режим на редакция всички функции в прозореца на програмата са неактивни, освен бутона „Начертай“, който сменя етиката си с „Готово“, а подпрограмата *Source* е в режим на изчакване. В полето, намиращо се под десния ъгъл на координатната система (фиг. 2.2(6)) се изписват актуалните координати на характерните точки на тялото. След приключване на редакцията, която включва промяна на позицията и размерите на нововъведеното тяло, се натиска бутона „Готово“, при което подпрограмата *Source* подава данните за вида на тялото и неговите параметри към съответната програма за геометризация и визуализация на графичния обект на екрана (*SphereGEOM.m*, *CylinderGEOM.m*, *PrismGEOM.m* или *EllipseGEOM.m*). Успоредно с параметрите и етикетите, които геометризиращите програми интегрират в графичните обекти, в тяхната структура се внедрява програмата *moveit2D.m*, модификация на програмата *moveit.m* (Copyright © 2009, Anders Brun. All rights reserved.), която осигурява свободното им движение при захващане с левия бутон на мишката. Бутонът „Редактирай“ стартира подпрограмата *ModelEdit*, която трансформира обектите от модела в редактируеми контури. Това превключва *ModelEdit* в режим на изчакване и деактивира бутоните на екрана. Промените се записват и моделът се визуализира след освобождаване на изчакващата подпрограма с бутона „Обнови“. Флагът „Етикети“ премахва или добавя етикетите на елементите в модела, които съдържат индекс на елемента + номер по ред и ефективна плътност в g/cm^3 , а плъгачът „прозрачност на модела“ – сменя степента на наситеност на цветовете на телата. Останалите обекти в панела „СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ“ са неактивни за двумерната задача.

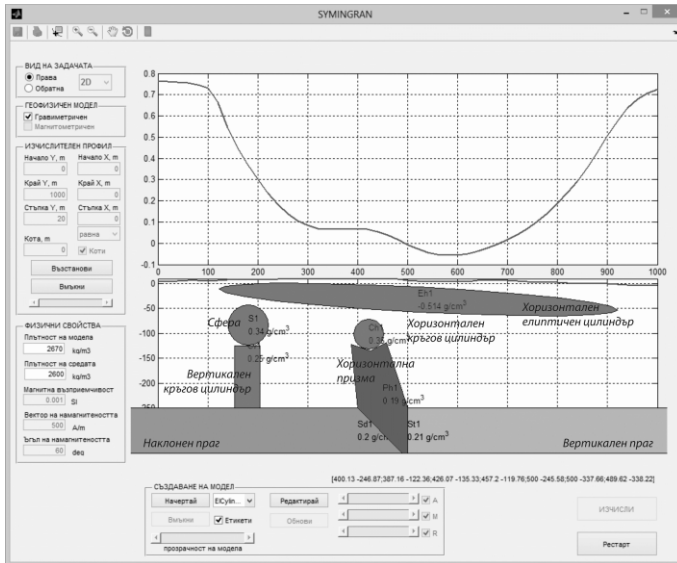
Изчисляването на аномалното поле Δg_m се извършва с подпрограмата *CALCULATE*, която се активира от бутона „Изчисли“ (фиг. 2.2(8)). В зависимост от броя M на отделните тела в модела, тя извиква последователно програмите от табл. 2.1. като, основавайки се на принципа за адитивност на гравитационното поле, сумира влиянието им. Ако броят тела N от даден вид е по-голям от едно, кореспондиращата програма се зацикля, натрупвайки стойностите на аномалиите им, след което продължава нататък. Алгоритъмът за сумиране на аномалния ефект на телата се онагледява с изрза:

$$\Delta g_m = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \Delta g_{m\text{яно},ij} \quad (2.1)$$

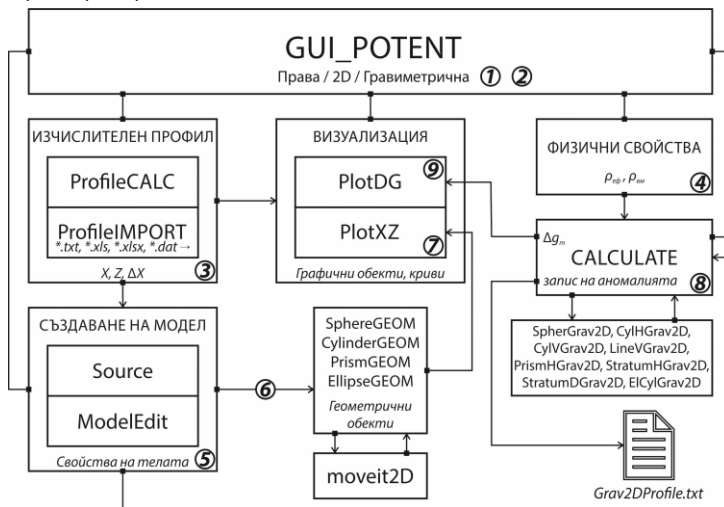
След сумирането на гравитационните ефекти на телата аномалното поле на модела Δg_m се изчертава във вид на крива в координатната система (фиг. 2.3).

Изчислените аномални стойности на моделното поле по профила се записват във външен текстови ASCII файл. Файлът се именува *Grav2Dprofile.txt* и съдържа подредени в колони координатите на наблюдателните точки по оста X , техните коти Z , стойностите на аномалията Δg в точките и ако са налични стойностите на производните V_{xz} и V_{zz} .

Последователността на изпълнение на отделните програми, подпрограми и функции при решаване на правата двумерна гравиметрична задача е показана на фиг. 2.4.



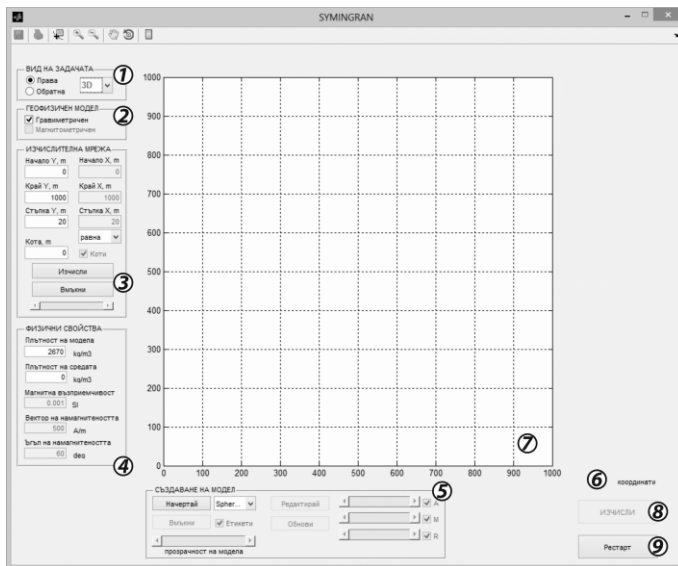
Фигура 2.3. Демонстрационен двуизмерен гравиметричен модел, включващ различни, отличаващи се по плътност геометрични обекти с изчислена сумарна моделна аномалия Δg_m по неравен релеф.



Фигура 2.4. Блок диаграма на алгоритъма за решаване на правата двумерна гравиметрична задача с имената на основните програми и номерация на етапите на процеса на моделиране съгласно фиг.2.2.

Права тримерна задача

Принципът за решаване на правата тримерна гравиметрична задача е идентичен с гореописания, затова описанието е изложено съвсем накратко като е наблегнато единствено на характеристиките за този случай особености. Тук настройката в панела „**Вид на Задачата**“ е „**Права – 3D**“ (фиг. 2.5(1)).



Фигура 2.5. Външен вид на графичния интерфейс на СИМИНГРАН в режим на готовност за решаване на права тримерна задача.

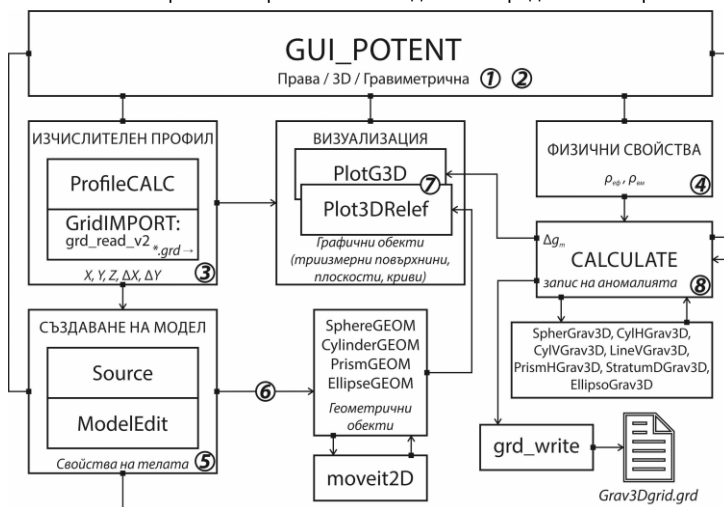
В следващия панел „**ИЗЧИСЛИТЕЛНА МРЕЖА**“ (фиг. 2.5(3)), се задават параметрите на изчислителната мрежа (гид), в рамките на която ще бъде решавана правата гравиметрична задача. В полетата по-долу се въвеждат началната и крайната координата на мрежата по оста Y (Север) и стъпката по нея в метри. Тези стойности се възприемат автоматично и за оста X (Изток). Ако е необходимо координатите на началните и крайните точки и стъпката по X и Y да се отличават, следва значението на падащото меню под неактивните настройки за оста X да се смени от „**равна**“ на „**неравна**“, което активира съответните полета за въвеждане на желаните стойности. Актуализацията на параметрите на изчислителния гид (фиг. 2.5(7)) става чрез бутона „**Изчисли**“, стартирач подпрограмата *ProfileCALC*. В триизмерната задача бутонът „**Вмъкни**“ стартира подпрограмата *GridIMPORT* и служи за вмъкване на предварително създаден топографски файл в слоя *Plot3DRelef*, намиращ се в рамките на координатната мрежа за визуализация на модела. За тази цел *GridIMPORT* използва програмата *grd_read_v2* (Coded by Alberto Avila Armella. Updated & improved by Jose Maria Garcia-Valdecasas), която чете и импортира в MATLAB текстови гридове (ASCII формат) от вида *GRD Surfer 6 Text Grid (*.grd)* на Golden Software Surfer. Вмъкнатата топографска информация се визуализира в рамките на предефинираните, съгласно характеристиките на изходния гид, граници на координатната система (фиг. 2.5(7)), след което изчислените основни параметри по X и Y (начало, край и стъпка) се изписват в съответните полета, които

стават неактивни. Активират се флагът **Kom** и плъзгачът в най-долната част на панела, чрез които се контролират съответно видимостта на надписите по хоризонталите и прозрачността на релефа.

Следващите стъпки за създаването на триизмерния модел не се отличават значително от тези на двумерния. По-съществена разлика има при визуализацията на изчислената с подпрограмата **CALCULATE** аномалия Δg_m . В този случай сумарното аномално поле на модела се визуализира в лейъра PlotG3D, при което се активират, контролиращият надписите на изогалите флаг **M** и съответствания му плъзгач, с който се променя степента на прозрачност на моделната аномалия.

Сумарното аномално поле на модела се записва в грид от програмата **grd_write** (Coded by Alberto Avila Armella. Updated & improved by Jose Maria Garcia-Valdecasas), която експортира в папката на програмата ASCII файл от вида GRD Surfer 6 Text Grid (*.grd) на Golden Software Surfer, озаглавен Grav3Dgrid.grd.

Блок схема на алгоритъма за решаване на задачата е представен на фиг. 2.6.



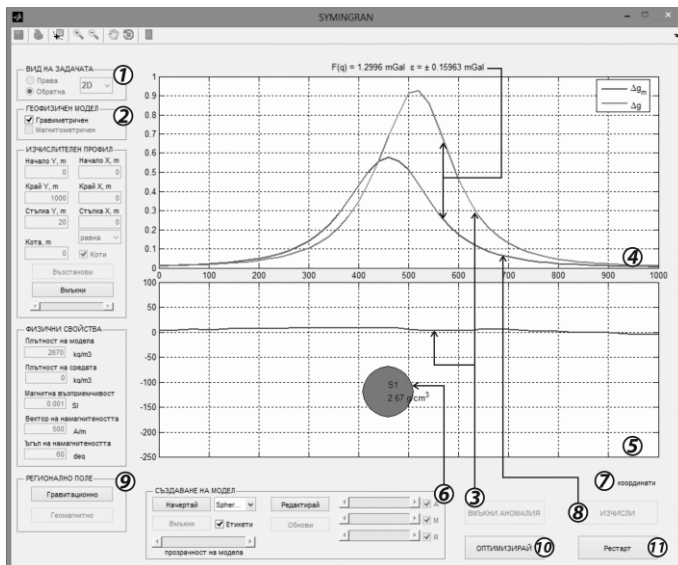
Фигура 2.6. Блок диаграма на алгоритъма за решаване на правата тримерна гравиметрична задача с номерация на отделните стъпки от създаването на моделите съгласно обозначенията на фиг.2.5.

6.3.3. Подпрограми и алгоритми за решаване на двумерна и тримерна обратна гравиметрична задача

Обратна двумерна задача

Режимът за решаване на обратна гравиметрична задача се активира след избор на радиобутона „Обратна“ в панела **„ВИД НА ЗАДАЧАТА“** (фиг. 2.7(1)). По този начин настройката на панела има вида **„Обратна / 2D“**. При тези настройки всички елементи от графичния интерфейс на програмата стават неактивни, докато в полето под панела **„ФИЗИЧНИ СВОЙСТВА“** се визуализира нов панел **„РЕГИОНАЛНО ПОЛЕ“** (фиг.2.7(9)), съдържащ два бутона – активният **„Гравитационно“** и неактивният към сегашния етап на разработката **„Геоманитно“**. Освен

това, вдясно от панела „**СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ**“ се визуализират и бутоните „**ВМЪКНИ аномалия**“ (фиг. 2.7(3)). и „**Оптимизирай**“ (фиг. 2.7(10)).



Фигура 2.7. Външен вид на графичния интерфейс на СИМИНГРАН в режим на решаване на обратна двумерна гравиметрична задача за измерена аномалия Δg чрез модел на сфера с аномалия Δg_m при неравен терен.

Решаването на обратната задача започва с вмъкване на интерпретираната гравиметрична аномалия в графичната среда. Това става чрез натискане на бутона „**ВМЪКНИ аномалия**“, който е свързан с подпрограмата *ANOMALY*, служеща за активиране на съответните елементи от ГПИ и стартиране на подпрограмата *AnomalyInversion* с помощта, на която се вмъкват данните за аномалията от предварително подготвен входен файл, съдържащ стойностите за X и Δg или за X, Z и Δg , ако са налични данни за релефа. Данните трябва да са систематизирани в колонки разделени с интервал или табулатор в обикновен текстови (*.txt) или табличен файл (*.xls, *.xlsx, *.dat). Аномалията Δg се визуализира в координатната система PlotDG (фиг. 2.7(4)) с червена крива, а профила X, Z – в PlotXZ (фиг. 2.7(5)) с кафява.

След тази процедура следва т.нар. **интерактивна оптимизация**, при която отговорността за създаването на издържан от физико-геоложка гледна точка модел, се пада на геофизика интерпретатор. Моделът се изгражда в интерактивен режим като от падащото меню в панела „**СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ**“ (фиг. 2.7(6)) се избират тела, които се изчертават след натискане на бутона „**Начертай**“. Технически погледнато, подходът при моделирането, включващ избора на тела, техните свойства, редакцията им в рамките на модела и включените в този процес подпрограми са идентични с описаните в предишната глава за правата задача. Съществена разлика представлява фактът, че геофизикът интерпретатор трябва да вземе предвид цялата налична геоложка информация, така че да създаде адекватен и логичен модел, който да създава максимално близко до измереното гравитационно поле Δg аномално поле Δg_m .

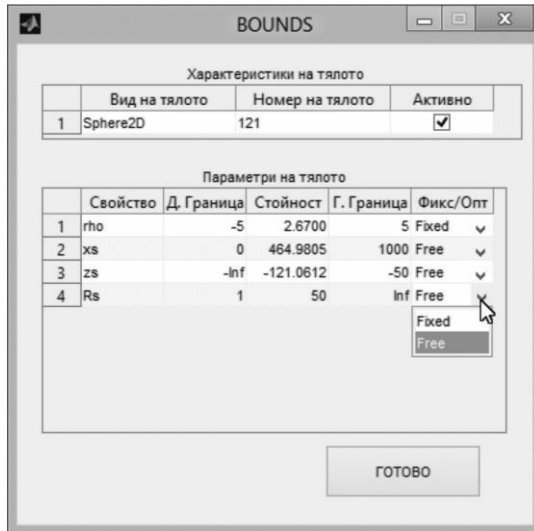
Контролът за тази близост се осъществява чрез последователност от интерактивно и параметрично моделиране и изчисляване на аномално поле, чрез натискане на бутона „Изчисли“ (фиг. 2.7(8)), който има същата функция като при правата задача. При това моделната аномалия се наслагва заедно с интерпретираната в координатната система PlotDG, но в син цвят. Оценката за близостта между двете аномалии се извършва визуално от оператора и чрез следене на изписаните в заглавната част на PlotDG стойностите на целевата функция, която е от вида:

$$S(p) = \sqrt{\frac{F(p)}{n}} \quad \text{и} \quad F(p) = \sum_{i=1}^n [\Delta g_i - \Delta g_{m,i}(p)]^2, \quad (2.2)$$

където p е наборът от k на брой оптимизирани параметри на модела, $p = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, а n е броят точки с данни по профила. По този начин се осигурява пълен контрол върху създаването на първо приближение на модела q_0 при достатъчно малки разлики между аномалното и моделното поле.

На този етап е подходящо интерпретаторът да анализира поведението на измереното поле и моделната аномалия, от гледна точка на евентуалното наличие на регионален фон в данните. Ако се прецени, че в тях се наблюдава влиянието на регионален смутител, изразено чрез характерен постоянен, линеен, параболичен или др. вид тренд е необходимо да се стартира специалният модул за отделяне на регионалното поле от интерпретираните данни (фиг. 2.7(9)). За гравиметрични данни това става чрез натискане на бутона „Гравитационно“. Подробно описание на алгоритъма и методиката за отделяне влиянието на регионалните смутители от данните е представено в подточка 6.3.4 по-долу.

Следващият етап на интерпретацията, автоматизираната оптимизация стартира с натискане на бутона „Оптимизирай“ (фиг. 2.7(10)), който стартира подпрограмата Optimization, която запамятава параметрите на всички тела в модела и ги препраща към програмата StartPointOptimization. Там въз основа на техния характер и типичните свойства на всяко едно тяло от модела по индивидуален алгоритъм се определят допустимите им долни и горни граници, след което тези стойности се визуализират в табличен вид, подходящ за редакция чрез програмата GUI_POTENT_fixtable (фиг. 2.8). В горната си част панелът „BOUNDS“ съдържа информация за текущото тяло, която включва неговия вид и уникален номер. Последното поле, в което по подразбиране е отметнат флагът „Активно“, дава възможност тялото да бъде изключено от оптимизираната процедура, т.е. да бъде фиксирано в модела, чрез премахване на отметката. В долната част на панела се изписват характерните свойства на тялото, които са различни за отделните видове геометрични тела включени в програмата, тъй като се описват с различен брой параметри. Първата колонка не подлежи на редакция като в нея се изписва името на оптимизирания параметър. Втората и четвъртата колонки съдържат автоматично определени стойности за долната и горна граници на оптимизирания параметър. Стойностите в тези две колонки могат да бъдат променени произволно от интерпретатора като единственото ограничение е долната граница да има по-малка стойност от горната и оптимизираната променлива записана в не редактируемата трета колонка да попада между тях. Последната колонка от тип падащо меню дава възможност за фиксиране на конкретни параметри на тялото чрез избор на опцията „Fixed“ или допускане на параметъра до оптимизация чрез задаване на опцията „Free“. След завършване на настройката на оптимизираните параметри на тялото се натиска бутона „Готово“, при което прозореца се затваря, зададените граници се запамятават и при наличие на други тела в модела се отваря подобен прозорец за следващото тяло.



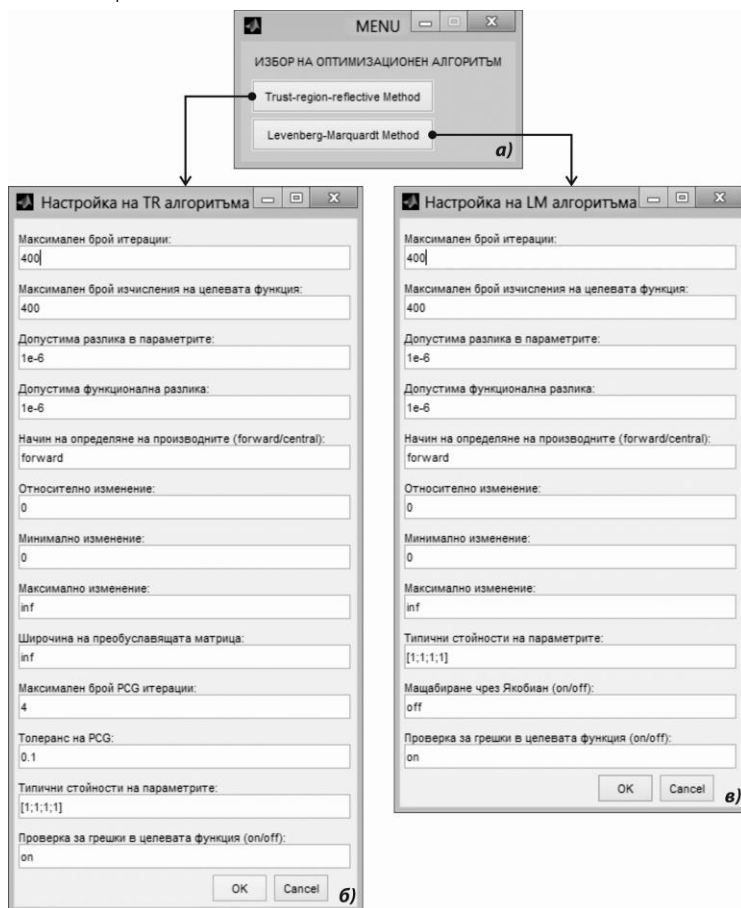
Фигура 2.8. Панел „BOUNDS“ за въвеждане на долните и горните граници на оптимизираните параметри, активиран от програмата GUI_POTENT_fixtable.

В следващия етап от оптимизацията на модела, данните за него се прехвърлят към програмата *OptimizationProperties*, където операторът има възможност да избира между два оптимизационни алгоритми (фиг. 2.9а):

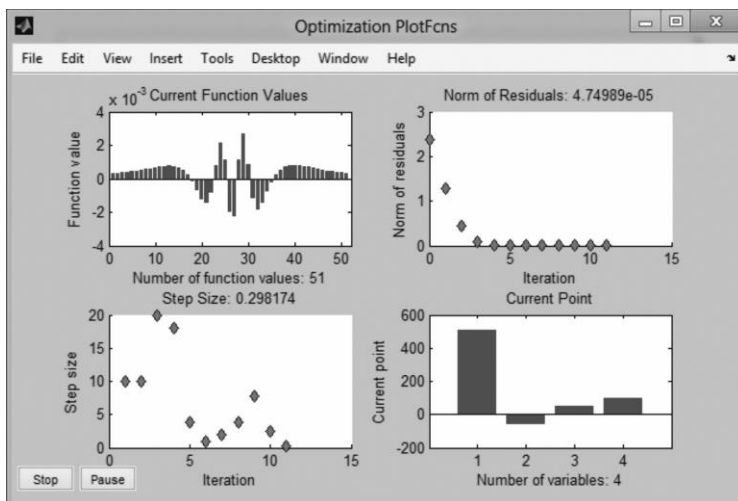
- Метод Левенберг-Марквард /ЛМ/ (Levenberg-Marquardt Method) – наложил се е като най-подходящ в досегашната геофизична практика. Той притежава диференциални авторегуляриращи свойства.
- Метод на доверителната област /ДО/ (Trust-Region Reflective Method) – оптимизацията се извършва в рамките на вътрешно изчислена или предварително определена област на допустимите решения, която в зависимост от получените резултати се разширява или свива (More & Sorensen, 1983). Търсенето на глобалния минимум се извършва по начин принципно идентичен с този в горния метод (Roberto, Moraes & Hansen, 2001).

След въвеждане на съответните настройки в избрания оптимизационен алгоритъм и тяхното потвърждаване (виж подточка 6.3.5) те се запаметяват и заедно със стойностите на оптимизираните параметри; полето на модела; аномалното поле; допустимите долни и горни граници на оптимизираните параметри се подават към програмата *OPT_Isqcurvefit2*. Тази програма представлява модификация на заложената в оптимизационния инструментариум на MATLAB програма *Isqcurvefit*. Заедно с данните подадени към *OPT_Isqcurvefit2* се дефинира и целевата функция, която в случая се представлява от програмата *OPTIMIZATOR*. В нея е разработен специален алгоритъм, позволяващ последователното извикване на модифицираните програми (*optSpherGrav2D*, *optCylHGGrav2D*, *optCylVGrav2D*, *optLineVGrav2D* и т.н.) за изчисляване полето на оптимизираните телата от модела. По този начин, всички параметри необходими за преминаване към вътрешният етап от автоматизираната оптимизация са дефинирани. Тази част от оптимизацията се осъществява чрез

автоматизирано комбиниране на използваните от *lsqcurvefit* подпрограми включени в Optimization Tool на MATLAB и извиканите от *OPTIMIZATOR* програми, изчисляващи полето на оптимизираните тела в модела. По време на този процес интерпретаторът има възможност да следи някои от най-важните параметри на оптимизацията, както и да наблюдава в реално време промените, които настъпват в оптимизирания модел. Параметрите на оптимизацията се представят в графичен вид, в автоматично отварящият се прозорец *Optimization PlotFcns* (фиг. 2.10), който се обновява след всяка итерация, което дава възможност за проследяване хода на оптимизацията.



Фигура 2.9. Схема на менюто, обезпечаващо а) избора на оптимизационен алгоритъм и последващите прозорци с настройки за б) метода на ДО или в) метода ЛМ.



Фигура 2.10. Прозорец с графично представяне на някои основни елементи на оптимизацията с възможност за временно спиране и/или прекъсване на процеса.

Прозорецът на фиг. 2.10 съдържа следните четири отделни графични елемента, предоставящи на интерпретатора възможност за следене и интерактивна намеса в оптимизационния процес:

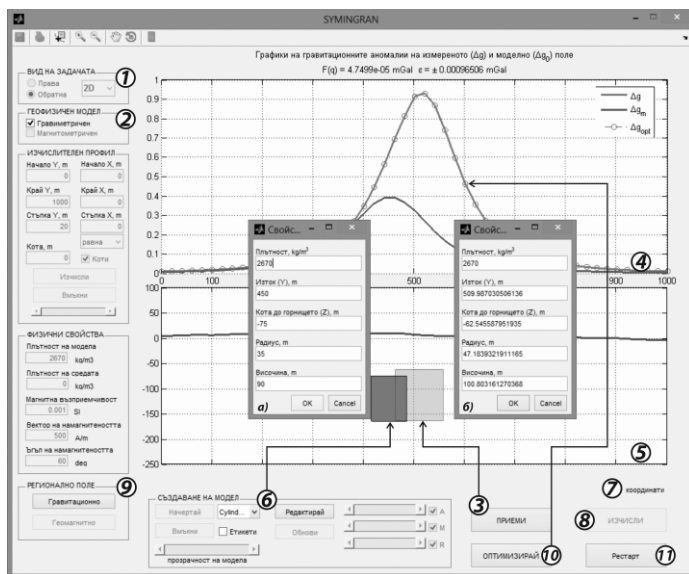
- `optimplotfval` – разположена в горния ляв ъгъл стълбообразна графика на стойностите на остатъчното поле $\Delta g_{opt} = \Delta g_m - \Delta g$;
- `optimplotresnorm` – намира се горе вдясно и представлява точкова графика на стойностите на нормата на остатъчното поле за всяка итерация изчислена по формулата $F(p) = \sum_{i=1}^n [\Delta g_i - \Delta g_{m,i}(p)]^2$;
- `optimplotstepsize` – в долния ляв ъгъл се намира точкова графика на размера на стъпката на изменение на параметрите при всяка итерация;
- `optimplotx` – стълбова диаграма на стойностите на оптимизираните параметри, намираща се долу вдясно.

Като допълнителна възможност в прозореца е добавена възможност за временно спиране на оптимизационния процес чрез бутона „**Pause**“. Продължаването на оптимизацията става като същият бутон, вече с променен етикет „**Resume**“, бъде натиснат повторно. Ако при минимизацията на целевата функция решението тръгне в нежелана посока или зацikli, интерпретаторът може да прекрати оптимизацията с натискане на бутона „**Stop**“.

Оптимизацията се прекратява и при редица други причини посочени в подточка 6.3.5. Причините за прекратяване на оптимизацията (табл. 2.3) се указват от стойността на променливата `exitflag`, която се записва в изходния файл.

Таблица 2.3. Описание на значението на стойностите на аргумента *exitflag*, указващи причините за прекратяване на оптимизационния процес.

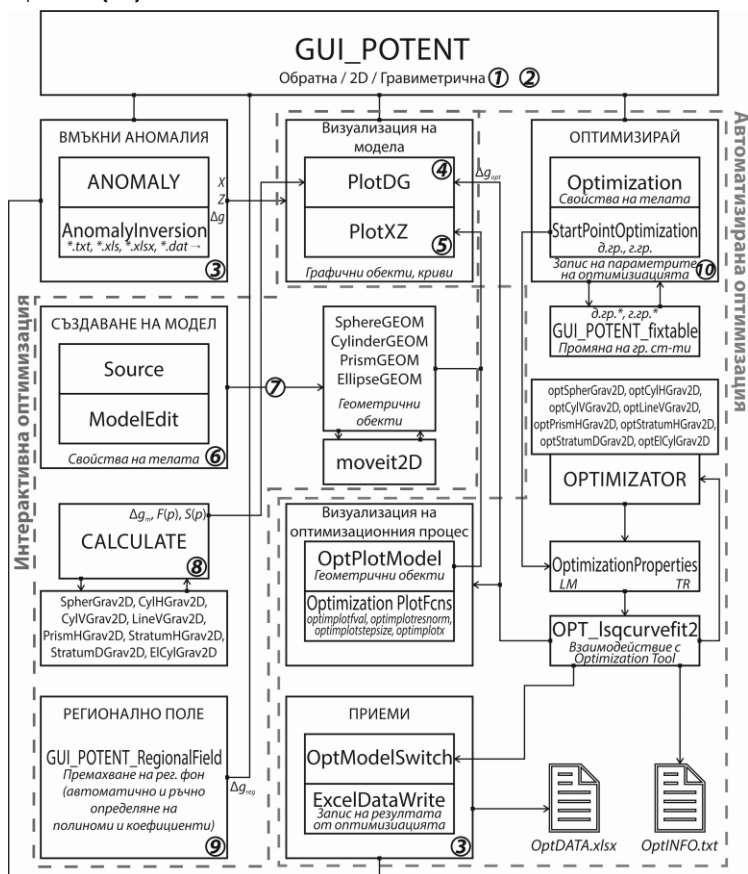
| <i>exitflag</i> | Причина за прекратяване на изчисленията |
|-----------------|---|
| 1 | Оптимизационния процес е сходящ |
| 2 | Изменението в оптимизираните параметри за две последователни итерации е по-малко или равно на зададената допустима разлика |
| 3 | Изменението в стойностите на разликовата функция за две последователни итерации е по-малко или равно на зададената допустима разлика |
| 4 | Магнитудът на посоката на търсене на оптимизираните параметри е по-малък от зададения допуск |
| 0 | Броят на итерациите е достигнал максимално допустимия или броят на изчисления на целевата функция е достигнал максимално допустимия преди достигане на зададените допуски |
| -1 | Изчисленията са прекратени от потребителска функция или от интерпретатора |
| -2 | Не е намерено приемливо решение – зададените граници са несъвместими с решаваната задача |
| -4 | Оптимизацията не може да продължи |



Фигура 2.11. Оптимизиран модел на аномалията на сфера ($x_c = 510 \text{ m}$, $z_c = -110 \text{ m}$, $R = 55 \text{ m}$, $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$) чрез модел на вертикален кръгов цилиндър. Параметрите на модела на първото приближение са посочени в прозорец а), а тези на оптимизирания модел в б).

По време на оптимизацията всички елементи от графичния интерфейс на SYMINGRAN.exe са неактивни. При всяка итерация се активира програмата за изобразяване на оптимизираното решение *OptPlotModel*. С нейна помощ в обособената за визуализация на

модела част от екрана се изчертава формата и разположението на оптимизираното решение. По този начин в рамките на координатната система PlotXZ едновременно се наблюдават моделът на първото приближение (фиг. 2.11а) и актуалния за текущата итерация оптимизиран модел като за прегледност цветовете и контурите на втория модел са изцветлени (фиг. 2.11б). Паралелно с това, в разположената отгоре координатна система PlotDG, на фона на аномалното поле и аномалията на първото приближение се изобразява и аномалното поле на оптимизирания модел чрез крива от точки. Над графиката се изписват и актуалните стойности на функционала {2.2}.



Фигура 2.12. Блок диаграма на алгоритъма за решаване на обратната двумерна гравиметрична задача с номерация на отделните стъпки от създаването на моделите съгласно обозначенията на фиг.2.7 и фиг. 2.11.

След прекратяване на оптимизацията, в папката на програмата се записва текстовият файл OptINFO.txt, съдържащ информация за вида на избрания оптимизационен алгоритъм, броя оптимизирани параметри, причините за преустановяването ѝ и историята на

минимизация на целевата функция. Елементите на ГПИ, служещи за решаване на обратната гравиметрична задача отново стават активни, а бутонът „**Вмъкни аномалия**“ се преименува на „**Приеми**“. Тази промяна е свързана с това, че на екрана са представени два модела: първото приближение с плътен цвят и аномалия изобразена чрез синя крива и оптимизирания модел с прозрачна окраска и аномалия представена от розова крива от незапълнени точки (фиг. 2.11). Идеята тук е, интерпретаторът да прецени дали оптимизираният модел е адекватен и съответно да го приеме чрез натискане на бутона „**Приеми**“ или отхвърли като го изтрие чрез падащото меню от десния бутон на мишката. При изтриване на модела, следва да се повтори цялата процедура описана по-горе като съответно бъдат внесени подходящи поправки в първото приближение и/или методите за оптимизация и техните настройки.

С натискане на бутона „**Приеми**“ се активира програмата *OptModelSwich*, която изтрива всички тела в модела и ги заменя с резултантния модел от автоматизираната оптимизация. Същевременно параметрите на първото приближение и оптимизираното решение се подават към програмата *ExcelDataWrite*, която ги записва във външен табличен файл. Името на файла е OptDATA.xlsx и освен това съдържа някои основни параметри на оптимизацията, разликото поле между аномалията и полето на оптимизирания модел, зададените моделни ограничения и др.

Решената по този начин обратна гравиметрична задача се явява вариантното решение, в което по преценка на интерпретатора е възможно въвеждането на допълнителна информация под формата на усложняване на модела, заместване на едни обекти с други, промяна на наложените ограничения и т.н., след което задачата следва да се реши наново.

Обратна тримерна задача

В стартово положение за решаване на обратна триизмерна гравиметрична задача панелът „**Вид на задачата**“ (фиг. 2.13(1)) е настроен на „**Обратна / 3D**“, а отметката в панела „**ГЕОФИЗИЧЕН МОДЕЛ**“ остава на „**Гравиметричен**“ (фиг. 2.13(2)).

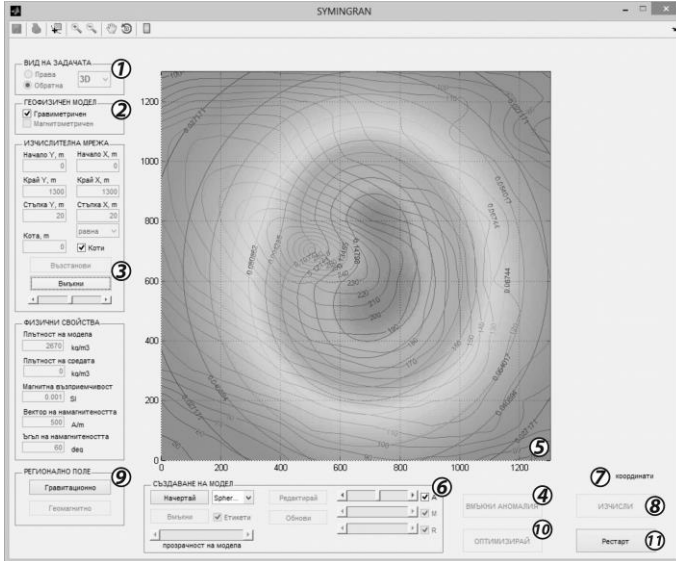
За разлика от двумерната задача в панела „**ИЗЧИСЛИТЕЛЕН ПРОФИЛ**“ (фиг. 2.13(3)) бутонът „**Вмъкни**“ остава активен. С натискане на бутона се отваря прозорец, в който е необходимо да се посочи местоположението на файла с данните за координатната мрежа и котите на измервателните точки, след което файлът се импортира в модела. Този файл трябва предварително да е оформен във вида на Surfer 6 Text Grid (*.grid) грид с кодирани от вида ASCII, чиито размер и стълка да съответстват на тези на грида, съдържащ данните за аномалното поле. След вмъкването на топографската информация се активира флагът „**Коти**“, позволяващ скриването или показването на етикетите на хоризонталите.

Вмъкването на аномалното поле Δg става чрез натискане на бутона „**Вмъкни аномалия**“ (фиг. 2.16(4)). Програмите осъществяващи това са идентични на тези при двумерния случай разликата се състои в това, че в програмата *AnomalyInversion* това действие се препраща към програмните редове за дешифриране на гридове от споменатия по-горе вид. Като резултат от това в програмата се импортира съответната аномалия, а най-горния плъзгач и съответстващата му отметка се активират. Чрез плъзгане на индикатора на плъзгача надясно изображението на аномалното поле се насища, а наляво – избледнява. Отметката, подобно на тази за релефа, служи за показване или скриване на надписите.

Подходът при последващата интерактивна оптимизация е същият както в двумерния случай. Задаването и моделирането на телата става от панела „**СЪЗДАВАНЕ НА МОДЕЛ**“ (фиг. 2.13(6)) като се борави с интегрираните в програмата триизмерни модели на прости тела. При натискане на бутона „**Изчисли**“ (фиг. 2.13(8)) се изчислява полето Δg_m на телата в модела и се определя разликвата аномалия Δg_{res} съгласно израза:

$$\Delta g_{res} = \Delta g_m - \Delta g, \quad (2.3)$$

след което чрез последователно автоматично прилагане на програмата *grd_write* се записват три грида, съдържащи аномалното, моделното и разликовото поле, съответно *Grav3Dgrid.grd*, *Grav3Dgrid_A.grd* и *Grav3Dgrid_R.grd*. Успоредно с това непосредствено над рамката за визуализиране на модела се изписват стойностите на целевата функция изчислени съгласно изразите {2.2}.



Фигура 2.13. Външен вид на графичния интерфейс на СИМИНГРАН в стартов режим на решаване на обратна тримерна гравиметрична задача за аномалия Δg с топография.

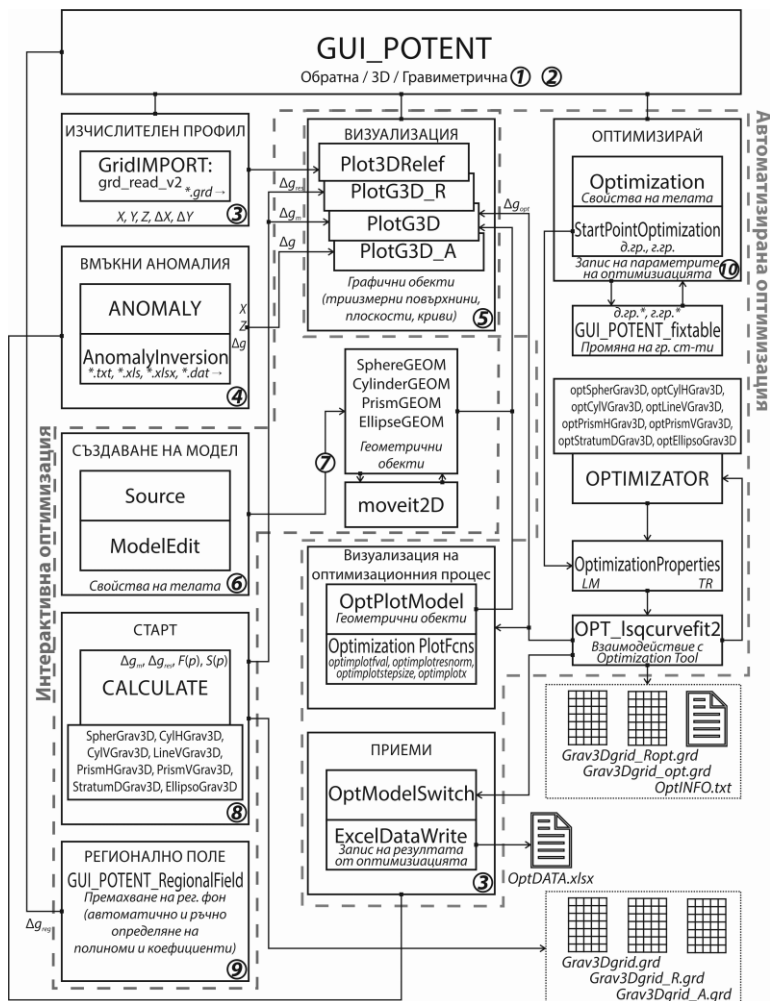
Визуално, триизмерният гравиметричен модел се отличава от двумерния по това, че е възможно представянето му в различни перспективи. Това става възможно след като от менюто на програмата (лентата с бутони в горната част) се активира седмият бутон от ляво на дясно. В този режим операторът има възможност да завърта модела в произволна посока в рамките на координирана кубична координатна система като движи мишката с натиснат ляв бутон или използва падащото от десния бутон меню.

Отделните етапи на автоматизираната оптимизация (дефиниране на оптимизираните параметри и граничните им стойности (фиг. 2.8), избор на оптимизационен алгоритъм (фиг. 2.9), визуализация и контрол на оптимизационния процес (фиг. 2.10) и т.н.) протичат по-описания вече в двумерната оптимизация ред. Програмите, оптимизирани отделните тела в модела са *optSpherGrav3D.m*, *optCylHGrav3D.m*, *CylVGrav3D.m*, *optLineVGrav3D.m*, *optPrismHGrav3D.m*, *optPrismVGrav3D.m*, *optStratumDGrav3D.m*, *optStratumDGrav3D.m*, *optEllipsoGrav3D.m*.

Когато оптимизацията достигне до някои от критериите за прекратяване на процеса (табл. 2.3), освен файлът с характеристиките на оптимизационния процес *OptINFO.txt* се генерират други два допълнителни файла. Първият *Grav3Dgrid_opt.grd* представлява GRID,

съдържащо аномалното поле на модела получено след приключване на автоматизираната оптимизация, а вторият – Grav3Dgrid_Ropt.grd – съдържа разликовото поле между измерената аномалия и крайната оптимизация.

Схема на блок диаграмата, онагледяваща използваните за решаване на обратната триизмерна задача програми и алгоритми е илюстрирана на фиг. 2.14.



Фигура 2.14. Блок диаграма на алгоритма за решаване на обратната тримерна гравиметрична задача с номерация на отделните стъпки от създаването на моделите съгласно обозначенията на фиг.2.13.

6.3.4. Определяне влиянието на регионални смутители в данните

Моделиране на регионалните смутители

Ако вида и формата на регионалните смутители са известни те могат да бъдат моделирани предварително в рамките на СИМИНГРАН, след което полученият резултат да се извади от интерпретираните профили или карти с помощта на подходяща стандартна програма (Excel, Surfer и др.). Друг вариант на метода се състои в това, локалните и регионалните смутители да съставляват един общ модел, при който по усмотрение на интерпретатора да се оптимизират съвместно или поотделно параметрите, както на едните, така и на другите.

Изчисляване на регионалния фон чрез полиноми от различна степен

Този подход е представен чрез разработения към системата СИМИНГРАН модул „РЕГИОНАЛНО ПОЛЕ“ (фиг. 2.17(9) и 2.18(9)) и се явява алтернатива на описания по-горе метод. Основната идея се състои в определянето на линейния (при 2D задачи) или пространствения (при 3D задачи) тренд на интерпретираните данни като за целта се използват определени чрез метода на най-малките квадрати полиноми от различна степен и ред, пресъздаващи най-добре тенденцията в изменението на данните по дадено направление на координатните оси.

При условие, че в интерпретираните данни се наблюдава присъствието на регионален гравитационен фон, интерпретаторът стартира модулет за неговото изчисляване чрез натискане на бутон „Гравитационно“ от панела „РЕГИОНАЛНО ПОЛЕ“, разположен долу вляво на програмния прозорец (фиг. 2.17(9)). Това стартира програмата GUI_POTENT_RegionalField, чийто ГПИ има вида представен на фиг. 2.19.

В падащото меню „Степен на полинома“ (фиг. 2.19(1)) се избира степента на апроксимация полином. За двумерната задача възможните степени са 9, а при триизмерната – 5. В случая, когато степента на полинома е „0“, регионално поле се възприема за константно като в двумерната задача се представя от успоредна на оста X линия, а в триизмерната, чрез равнина успоредна на равнината на координатните оси Y и X .

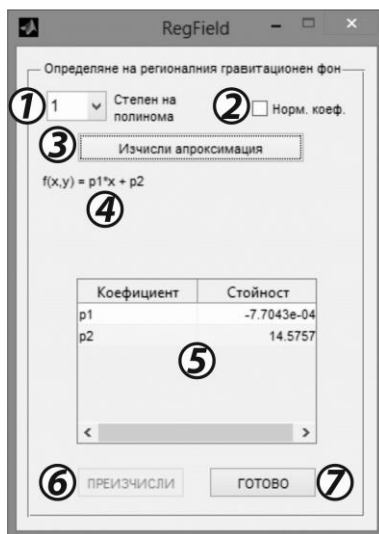
- В двумерния случай:

$$\Delta g_{reg} = \sum_{i=1}^{n+1} p_i X^{n+1-i}, \quad \{2.4\}$$

където $n+1$ е редът на полинома; n – неговата степен ($0 \leq n \leq 9$); p – коефициенти на полинома. Броят на коефициентите p се определя от реда на полинома. Така например полином от 3-та степен има вида $\Delta g_{reg} = p_1 X^3 + p_2 X^2 + p_3 X + p_4$.

- В триизмерния случай:

$$\begin{aligned} \Delta g_{reg}^{(0)} &= p_{0,0} \\ \Delta g_{reg}^{(1)} &= \Delta g_{reg}^{(0)} + p_{1,0} Y + p_{0,1} X \\ \Delta g_{reg}^{(2)} &= \Delta g_{reg}^{(1)} + p_{2,0} Y^2 + p_{1,1} YX + p_{0,2} X^2 \\ \Delta g_{reg}^{(3)} &= \Delta g_{reg}^{(2)} + p_{3,0} Y^3 + p_{2,1} Y^2 X + p_{1,2} YX^2 + p_{0,3} X^3 \\ \Delta g_{reg}^{(4)} &= \Delta g_{reg}^{(3)} + p_{4,0} Y^4 + p_{3,1} Y^3 X + p_{2,2} Y^2 X^2 + p_{1,3} YX^3 + p_{0,4} X^4 \\ \Delta g_{reg}^{(5)} &= \Delta g_{reg}^{(4)} + p_{5,0} Y^5 + p_{4,1} Y^4 X + p_{3,2} Y^3 X^2 + p_{2,3} Y^2 X^3 + p_{1,4} YX^4 + p_{0,5} X^5 \end{aligned} \quad \{2.5\}$$

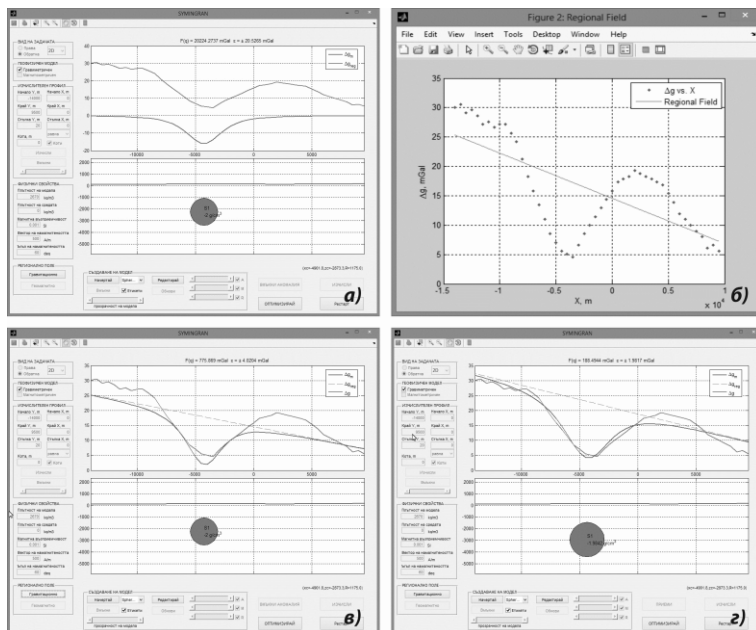


Фигура 2.15. Външен вид на диалоговия прозорец на програмата GUI_POTENT_RegionalField за изчисляване на регионалния фон чрез полиноми от различна степен.

Изборът на флага „Норм. коэф.“ (фиг. 2.15(2)) дава възможност изчислените коефициенти p да бъдат нормирани по отношение на координатна система с начало в центъра на профила или площта на гравитационната аномалия. По този начин стойностите на коефициентите имат отношение към визуализираното изображение на аномалията, което ги прави по-възприемчиви за интерпретатора. Това е удобно в случай, че координатите на данните са отместени спрямо началото на координатната система и е необходимо ръчно коригиране на някой от коефициентите за получаване на по-добра апроксимация на регионалния фон след автоматичното им определяне.

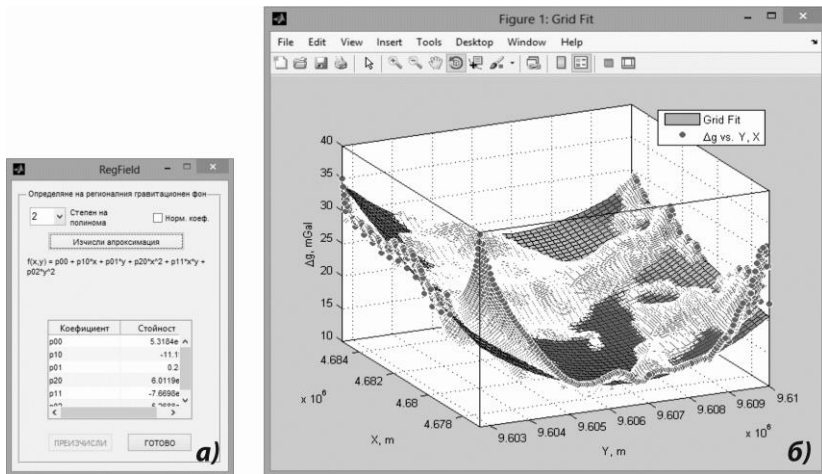
След като бъдат зададени степента на полинома и начина за определяне на коефициентите на апроксимация се натиска бутонът „Изчисли апроксимация“, с което се стартира процедурата за определяне на коефициентите на съответния полином. Тяхното определяне се осъществява чрез метода на най-малките квадрати, след което названието и стойностите им се представят в таблицата представена на фиг. 2.15(5), докато в полето над нея (фиг. 2.15(4)) се изписва формулата на аналитичния израз, в зависимост от вида на задачата и степента на полинома. Същевременно се визуализира фигура, съдържаща интерпретираната аномалия и кривата на апроксимиращия регионалното поле полином (фиг. 2.16б). Ако по преценка на интерпретатора е необходима промяна в изчислените коефициенти, то това може да се осъществи чрез директната им редакция чрез мишката и клавиатурата в таблицата с техните стойности (фиг. 2.15(5)). Изчисляването на регионалния фон с ръчно въведените коефициенти се извършва след натискане на бутона „Преизчисли“. След натискане на бутона „Приеми“, определеното чрез програмата RegFieldGrav2D регионално поле се изважда от интерпретираните данни. Получения резултат се визуализира в главния прозорец на системата (фиг. 2.16в), след което се пристъпва към по-нататъшната интерпретация на данните. При стартиране на автоматизираната оптимизация,

непосредствено след задаване на допустимите граници на модела в диалоговия прозорец на програмата *GUI_POTENT_fixtable* (фиг. 2.8), следва запитване дали параметрите на изчисления регионален фон да бъдат оптимизирани съвместно с останалите моделни параметри. Ако отговорът е „Да“, коефициентите на регионалният фон се включват във формираните от останалите оптимизиращи се параметри вектор. Програмата, спомагаща оптимизацията на регионалното поле е *RegFieldGrav2D_opt*. На фигура 2.16а е представено едно такова оптимизирано решение.



Фигура 2.16. Етапи на интерпретация при наличие на регионален фон в данните: а) интерактивна оптимизация; б) определяне на регионалния фон; в) вмъкване на регионалния фон в данните; г) автоматизирана оптимизация.

В горното описание на алгоритъма за изчисляване на регионалния фон чрез полиноми от различна степен като основен пример е разгледан подходът при интерпретацията на двумерна гравитационна аномалия. В тази връзка тук трябва да се отбележи, че в разработената система *СИМИГРАН*, същите правила важат и за триизмерния случай. Разликите се състоят основно в начина на дефиниране на графичните обекти в пространството (координатни оси, повърхнини и т.н.), което е отразено в програмния код и съответстващите техники на визуализация на модела (фиг. 2.17).



Фигура 2.17. Определяне на пространствен полином от втора степен (вляво) и съответстващата му повърхнина съпоставена с интерпретираната гравитационна аномалия представена чрез серия от точки (вдясно).

6.3.5. Критерии за прекратяване на оптимизацията и настройки на алгоритмите

След избора на оптимизационен алгоритъм се пристъпва към неговата настройка, включваща задаване на стойностите на критериите за оптимизация, начина на изчисляване на производните на функционала и др. Представените възможности за контрол на оптимизационния процес са възприети от включените в Оптимизационния инструментариум на MATLAB опции.

Критерии за прекратяване на оптимизацията

- Максимален брой итерации (MaxIter): С този критерий се задава максималният допустим брой итерации. При достигане на посочения брой итерации, оптимизационният процес се прекратява автоматично.
- Максимален брой изчисления на целевата функция (MaxFunEvals): Въвежда се с цяло положително число и определя допустимият брой изчисления на целевата функция. След достигане на това число оптимизацията се преустановява.
- Допустима разлика в параметрите (TolX): Указва допустимата разлика в стойностите на оптимизираните параметри, съдържащи се в аргумента x при последните две итерации и служи като параметричен критерий за прекратяване на изчисленията.
- Допустима функционална разлика (TolFun): Представява допуск в разликата на стойностите на функцията при последните две итерации и служи като функционален критерий за прекратяване на оптимизацията.

Числово определяне на производните на функционала $F(\Delta g)$

Ако производните на функцията се изчисляват по метода на крайните разлики се въвеждат следните параметри:

- Начин на определяне на производните:

- Прогресивни разлики.
- Централни разлики.

Необходимото време за изчисляване на производните е в полза на първия подход, но централните разлики осигуряват по-висока точност при тяхното определяне.

- Относително изменение (FinDiffRelStep): Дефинира допустимата стъпка на относително изменение на променливите при численото пресмятане на производните.
- Минимално изменение (DiffMinChange): С този параметър се определя минималното изменение на променливите при численото пресмятане на производните.
- Максимално изменение (DiffMaxChange) – Параметърът дефинира максималното изменение на променливите при приблизителното определяне на производните.

Специални настройки на алгоритмите

За метода на доверителната област системата от линейни уравнения се решава по подразбиране чрез разлагане на Холецки. Допълнителна възможност за решение на системата може да бъде осигурено по метода на спрегнатия градиент с преобуславяне (PCG). Това става след като нулата в съответното поле за ширината на преобуславящата матрица се замени с положителна величина.

- Широчина на преобуславящата матрица (PrecondBandWidth) – Определя широчината на помощна лентова матрица (preconditioner), използвана в метода PCG.
- Максимален брой PCG итерации (MaxPCGIter) – Определя максималния брой итерации на спрегнатия градиент с преобуславяне.
- Толеранс на PCG (TolPCG) – Допуск, служещ като критерий за прекратяване на поредната PCG итерация.
- Типични стойности на параметрите (TypicalX) – В това поле се задават стандартни стойности за оптимизираните параметри.
- Мащабиране чрез Якобиан (Jacobian) – Тази функция, активна единствено за Левенберг-Марквард алгоритъма, повишава сходимостта на функцията при слабо изразени съотношения на оптимизираните параметри.

Други настройки

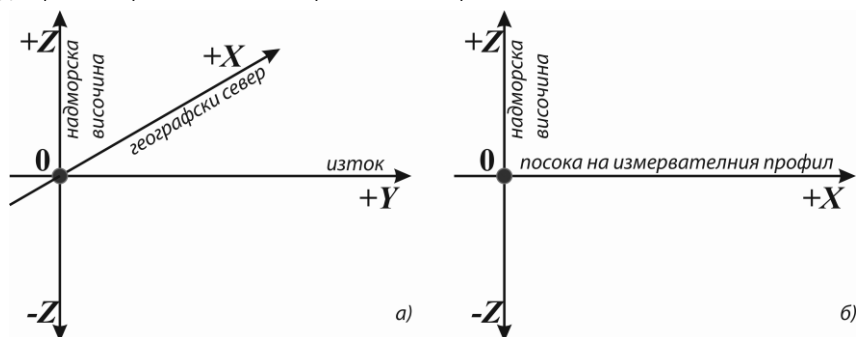
- Проверка за грешки в целевата функция (FunValCheck) – Тази опция позволява да бъде извършвана проверка на стойностите на целевата функция или функцията на граничните стойности ако е зададена такава. Ако е активирана (on), оптимизационният процес се прекратява, когато някоя от тези функции върне безкрайност (inf), неопределеност (NaN) или комплексно число.

7. Използвани от СИМИГРАН модели на тела за решаване на правата и обратна гравиметрични задачи

В тази глава на дисертационния труд са представени основните геометрични модели и техните аналитични изрази използвани от главния програмен модул на разработения пакет алгоритми и програми за решаване на правата и обратна двумерна и тримерна гравиметрични задачи в интерактивен режим. За краткост на изложението на автореферата моделите са представени предимно чрез визуално описание на характеризиращите ги геометрични и физични параметри.

7.1. Дефиниране на моделите в пространството

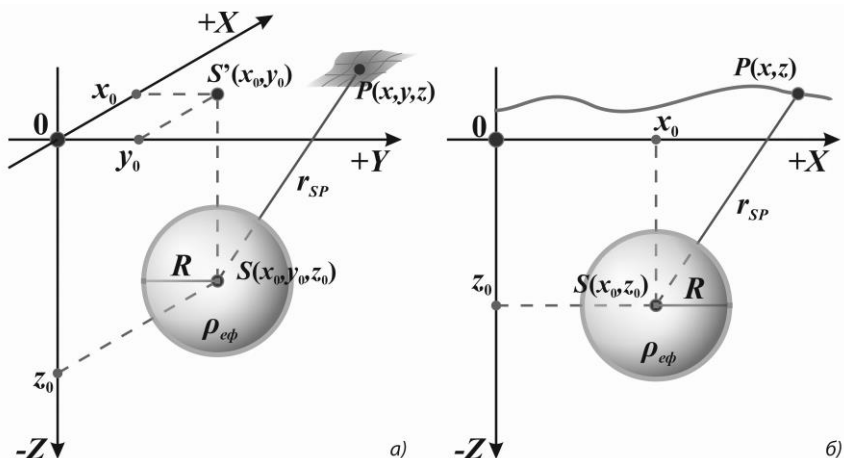
Моделното пространство в системата СИМИНГРАН се дефинира в рамките на Декартова координатна система представена на фиг. 2.18.



Фигура 2.18. Общ вид на координатните системи използвани в СИМИНГРАН, в рамките на които се решават а) тримерни и б) двумерни гравиметрични задачи.

7.2. Аналитични изрази и примери на телата интегрирани в СИМИНГРАН

7.2.1. Хомогенна сфера (*SpherGrav3D.m* и *SpherGrav2D.m*)

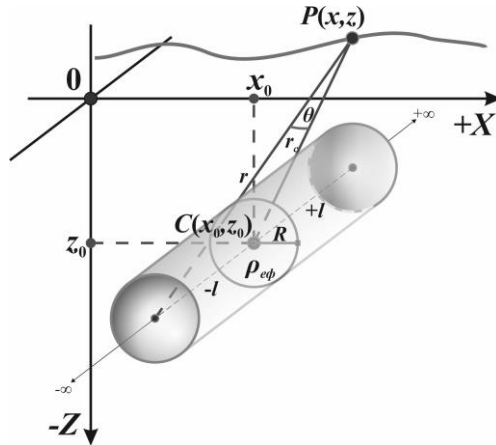


Фигура 2.19. Параметри, описващи модела на сфера с хомогенна плътност ρ_{eff} в а) тримерното и б) двумерното пространство.

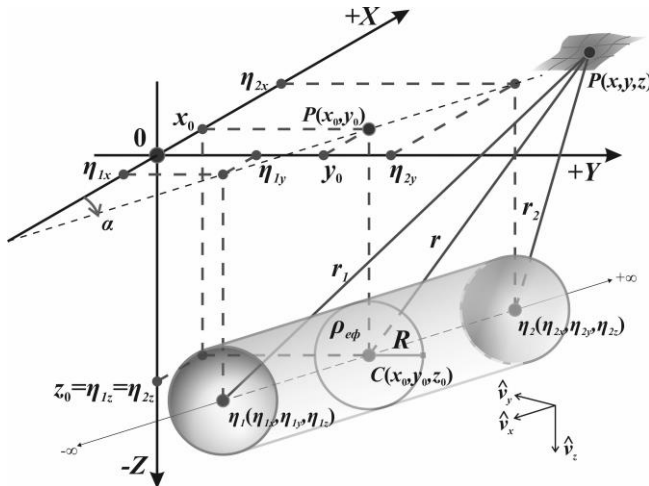
За решаване на правата задача за модела на сферично тяло с хомогенна плътност в триизмерното пространство е създадена програмата *SpherGrav3D.m* (фиг. 2.19). С нейна помощ се определя аномалното гравитационно поле Δg на сферата върху произволна повърхнина извън нея. Двумерната задача се решава с опростената и версия *SpherGrav2D.m*.

За решаване на обратната гравиметрична задача за сфера се използват модифицирани версии на горните две програми, съответно *SpherGrav3D_opt.m* и *SpherGrav2D_opt.m*.

7.2.2. Хоризонтален кръгов цилиндър (*CyIHGrav2D.m* и *CyIHGrav3D.m*)

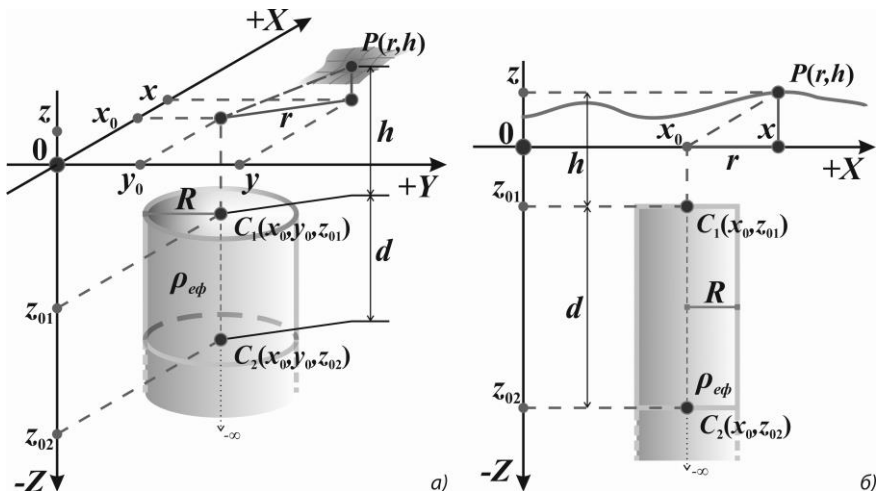


Фигура 2.20. Параметри на модела на хоризонтален 2½-мерен краен и безкраен кръгов цилиндър с хомогенна плътност в двумерното пространство.



Фигура 2.21. Параметри, описващи модела на краен триизмерен хоризонтален кръгов цилиндър с хомогенна плътност в тримерното пространство с възможност за завъртане по азимут.

7.2.3. Вертикален кръгов цилиндър (CylVGrav3D.m и CylVGrav2D.m)



Фигура 2.22. Параметри, описващи модела на ограничен в дълбочина или безкраен вертикален кръгов цилиндър с хомогенна плътност в а) тримерното и б) двумерното пространство.

От известните изрази за изчисляване на аномалния гравитационен ефект на модела на вертикален кръгов цилиндър в триизмерното пространство (Kim, 1987) може лесно да се премине към двумерна задача решена по профил X , минаващ над централната ос на цилиндъра (фиг. 2.22б). За целта в дисертационния труд от изразите са изключени всички променливи свързани с координатната ос Y .

За решаването на правата задача за краен и безкраен в дълбочина вертикален кръгов цилиндър са написани две програми: CylVGrav3D.m и CylVGrav2D.m. Първата изчислява полето в триизмерното пространство (фиг. 2.22а), а втората по профил X . Обратната задача се решава от съответните им версии CylVGrav3D_opt.m и CylVGrav2D_opt.m.

7.2.4. Вертикална материална линия (LineVGrav2D.m и LineVGrav3D.m)

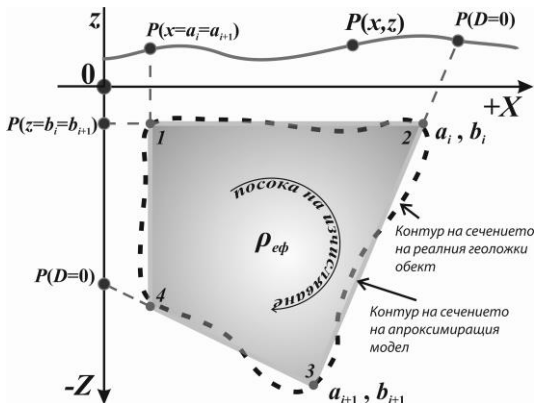
В СИМИНГРАН двумерната вертикална линия се визуализира като издължен вертикално, розов правоъгълник с ширина 5 m, а в триизмерната задача – като розов цилиндър с радиус $R = 5$ m. Параметрите, с които се задава са: линейна ефективна плътност λ в kg/m, координати на горната точка $L_1(x, y, z_{01})$ и височината на линията H в m.

За решаване на двумерната и триизмерната права задача за вертикална материална линия се използват съответно програмите LineVGrav2D.m и LineVGrav3D.m, а за решаване на обратната задача – техните модифицирани версии LineVGrav2D_opt.m и LineVGrav3D_opt.m.

7.2.5. Криволинейни хоризонтални призми

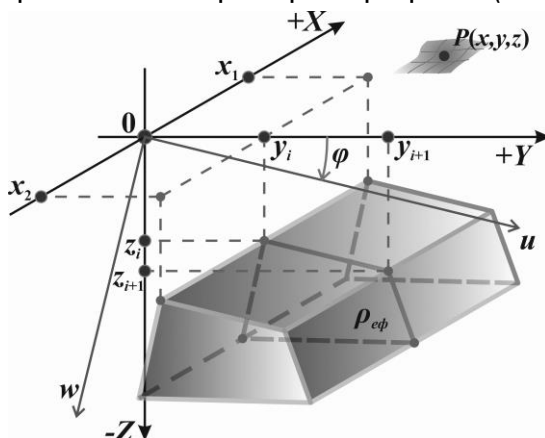
Двумерна задача за хоризонтална безкрайна по оста Y призма (*PrismHGrav2D.m*)

Апроксимацията на смутителите към многоъгълната форма дава възможност двумерните аномалии от хомогенни тела да се изчислят точно с крайни алгебрични изрази, получавани след последователно интегриране по линейните елементи от контура на един или няколко многоъгълници, пресъздаващи максимално близко с минимален брой параметри формата на търсените аномалообразуващи тела от разреза (фиг. 2.23).



Фигура 2.23. Параметри и особени положения на изчислителните точки P и контурните отсечки на хоризонтално безкрайно по оста Y призматично тяло (по Ставрев, 1985).

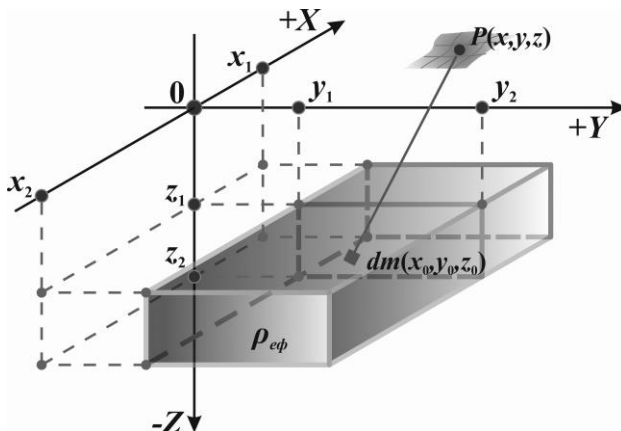
$2\frac{1}{2}$ -мерно призматично тяло в триизмерното пространство (*PrismHGrav3D.m*)



Фигура 2.24. Параметри на $2\frac{1}{2}$ -мерно призматично тяло (по Ставрев & Радичев, 1989) в триизмерното пространство.

7.2.6. Правоъгълен паралелепипед

Правоъгълният паралелепипед е форма, от която могат да се получат модели на хоризонтален безкраен пласт, вертикален праг и вертикален пласт. Стените на базовия модел на паралелепипед са успоредни на координатните равнини (фиг. 2.25).



Фигура 2.25. Модел на правоъгълен паралелепипед, служещ за основа за извеждане на моделите на хоризонтален безкраен пласт, вертикален праг и вертикален пласт.

Правоъгълна призма, безкрайна по направление на оста Y (*StratumHGrav2D.m*)

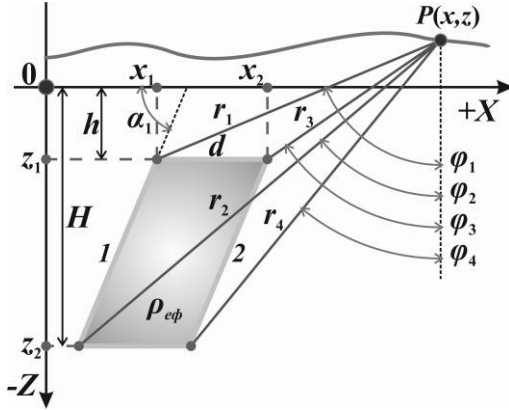
Заложеният в програмата *StratumHGrav2D.m* алгоритъм дават възможност при решаването на правата и обратната двумерна гравиметрична задача да бъде използван моделът на хоризонтален и/или вертикален пласт. Параметрите, с които се дефинира пластът в системата СИМИНГРАН са ефективната му плътност $\rho_{\text{еф}}$, координатите на левия и десния му край (a_1 и a_2) и координатите на неговото горнище и долнище (b_1 и b_2).

Като частен случай на двумерния пласт е разработен и моделът на вертикален праг, който представлява безкраен полупласт ограничен с една вертикална и две хоризонтални равнини.

7.2.7. Ограничен в дълбочина наклонен пласт и ляв и десен наклонен праг (*StratumDGrav2D.m*)

Гравитационното действие на ограничения в дълбочина наклонен пласт може да се представи като разлика на действията на два еднакви наклонени прага, разположени на една и съща дълбочина и отместени един спрямо друг на разстояние, равно на хоризонталната му мощност d (Димитров, 1976).

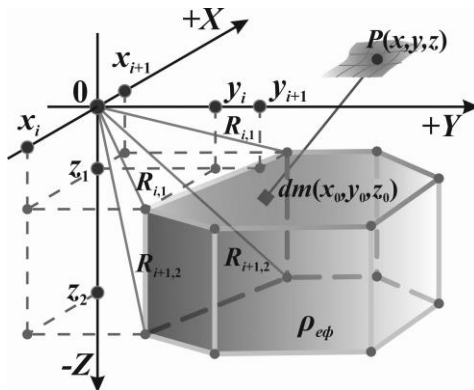
Наклонения праг, при който смущаващата маса е ограничена с две хоризонтални и една наклонена равнина, е геометрична форма, която отговаря на по-често срещаните в природата случаи на контакт между скали с различна плътност (фиг. 2.26).



Фигура 2.26. Пространствени параметри на двумерен ограничен в дълбочина вертикален пласт.

7.2.8. Вертикална правоъгълна призма с произволно сечение (*PrismVGrav3D.m*)

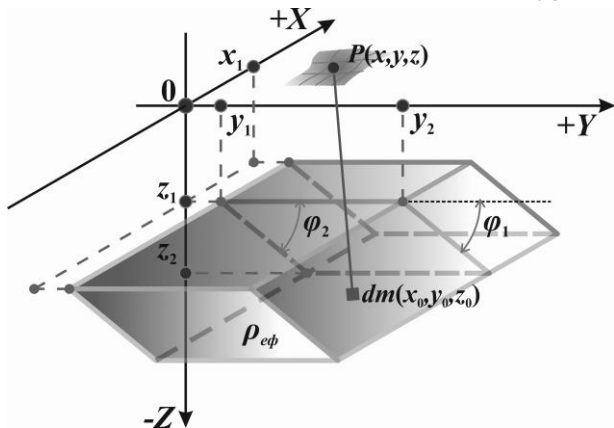
Съществуват различни подходи за решаване на правата задача за модела на вертикална правоъгълна призма. Основните параметри необходими за определяне на аномалното поле на вертикалната многоъгълна призма в пространството са илюстрирани на фиг. 2.27.



Фигура 2.27. Параметри на триизмерната вертикална многоъгълна призма при наблюдателна точка разположена в началото на координатната система.

7.2.9. Наклонена правоъгълна призма и трапециод (*StratumDGrav3D.m*)

Аналитичните изрази на полето на правоъгълна призма (фиг.2.28) са изведени от Наги (Nagy, 1966). По-късно моделът е усъвършенстван от Хелт, който извежда изразите за гравитационното поле на наклонена правоъгълна призма и трапециод (Hjelt, 1972b).



Фигура 2.28. Пространствени параметри на триизмерна вертикална правоъгълна призма ($\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$) и трапециод (при $\varphi_1 \neq \varphi_2$).

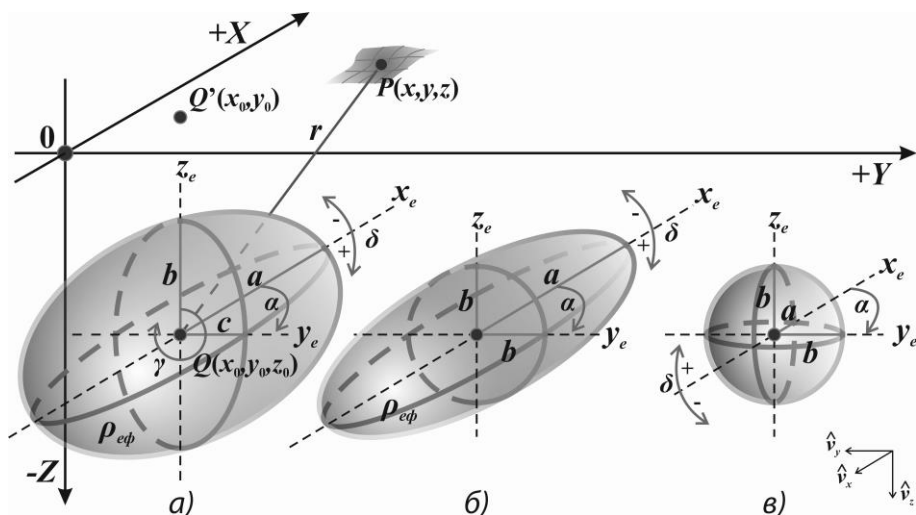
Моделът на правоъгълна призма се характеризира с някои особено полезни качества. Едно от тях е възможността за създаване на плътен слой или обем от елементарни призматични тела разположени в долното полупространство, след което чрез промяна в определени геометрични параметри (напр. на две срещуположни стени) или физични характеристики (преоразпределение на плътностите) на призмите в модела да бъдат апроксимирани сложни по форма геоложки тела (Cordell & Henderson, 1968; Ставрев & Радичев, 1984b; Li & Oldenburg, 1998 и др.).

Съгласно тази идея е разработен компютърен алгоритъм, използващ програмите *StratumDGrav3D.m* и *StratumDGrav3D_opt.m*, съответно служещи за решаване на правата и обратната гравиметрична задача за вертикална правоъгълна призма. С негова помощ се създават сложни триизмерни модели, съставени от краен брой елементарни призматични тела (Цанков & Папратилов, 2013). Реализацията на идеята се осъществява, след като в интерактивен режим се изчертава контура на горницето на т.нар. „изходна“ призма върху активния програмен прозорец. При потвърждение моделът се визуализира, след което може да бъде решена правата задача. Геометричните и физични (плътностни) свойства на „изходната“ призма могат да бъдат променяни по всяко време чрез отваряне на допълнителен диалогов прозорец от падащо меню на десния бутон на мишката. В същия диалогов прозорец се въвежда броят на „вторичните“ призми, на които ще бъде разцепена „изходната“ призма по X, Y и Z. По този начин може да се изгради пространствен модел от еднакви по размер „вторични“ призми, имащи общ обем и външни граници като тези на „изходната“ призма. След извършване на тази операция параметрите на новополучените призматични тела, също могат да бъдат променяни в зависимост от нуждите на моделирането.

7.2.10. Триосен, удължен и сплеснат елипсоид (*EllipsoGrav3D.m*)

Елипсоидът е триизмерно геометрично тяло – аналог на елипсата в триизмерното пространство. В зависимост от отношението между полуосите на елипсоида съществуват четири, отличаващи се по аналитичните си изрази модела на това геометрично тяло. В настоящата работа са разгледани и четирите възможни случая на формата на елипсоида, а именно:

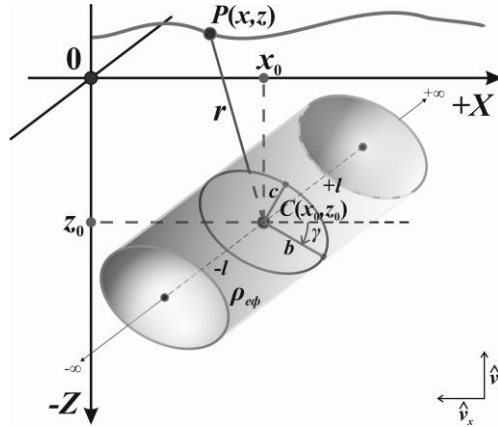
- $a > b > c$: триосен елипсоид (фиг. 2.29а);
- $a > b = c$: ротационен елипсоид по отношение на дългата си ос (удължен елипсоид) (фиг. 2.29б);
- $a < b = c$: ротационен елипсоид по отношение на късата си ос (сплеснат елипсоид) (фиг. 2.29в);
- $a = b = c$: изроден елипсоид (сфера).



Фигура 2.29. Графично представяне и основни параметри на моделите на триосен, удължен и сплеснат елипсоиди в триизмерното пространство.

7.2.11. Хоризонтален елиптичен цилиндър (*ElipCylGrav2D.m*)

Елиптичният цилиндър е цилиндрично геометрично тяло с елиптично сечение и крайна или безкрайна дължина по направление перпендикулярно на това сечение. Ясно е, че подобно на разгледания по-горе модел на хоризонтален кръгов цилиндър, елиптичният цилиндър по своята същност е $2\frac{1}{2}$ -мерен като за целите на решаването на правата и обратна гравиметрична задачи се приема, че моделът е успореден на оста Y на координатната система като се разглежда единствено сечението му във вертикалната равнина XZ (фиг. 2.30).



Фигура 2. 30. Параметри на модела на хоризонтален $2\frac{1}{2}$ -мерен краен и безкраен елиптически цилиндър с хомогенна плътност в двумерното пространство.

7.3. Кратко обобщение на приложението на представените модели

Разгледаните в тази точка 2D, $2\frac{1}{2}$ D и 3D модели на тела, служещи за решаване на правата и обратна гравиметрични задачи, могат да бъдат комбинирани, така че с помощта на системата СИМИГРАН да бъдат създавани практически неограничен брой модели, съставени от всевъзможни комбинации от геометрични форми. Това качество на системата е от голяма полза за решаването на задачи свързани с физико-геоложкото моделиране и количественото определяне на разпределението на плътностните нееднородности в рамките на изучавания модел. Такива са задачите свързани със структурната геология, търсенето и проучването на нефто-газоносни структури, търсене и проучване на въглищни находища, задачи свързани с търсене и проучване на рудни находища и др.

8. Тестване на алгоритмите и програмите

По-долу са представени някои по-важни тестове проведени с автоматизираната интерактивна система за решаване на правата и обратна гравиметрична задача СИМИГРАН. Част от тези тестове имаха за цел да проверят достоверността на аналитичните изрази на използваните модели както и коректността на написания програмен код. Други тестове бяха проведени, за да се направи оценка на възможностите на използваните алгоритми за оптимизация.

Стабилността на програмата е в непрекъснат процес на изпитания като всички възникнали до момента системни грешки и „бъгове“ са отстранявани и се отстраняват своевременно. Тъй като този аспект на програмирането не представлява предмет на настоящия дисертационен труд, то в нея не е обърнато специално внимание на него.

8.1. Сравняване на използваните модели за решаване на правата гравиметрична задача

За извършването на сравнителните тестове, телата са разделени съгласно пространствените си характеристики (2D, $2,5$ D, 3D) и някои други особености (крайни, безкрайни) в няколко удобни за апроксимиране групи, които са съпоставени едно с друго или с базов модел.

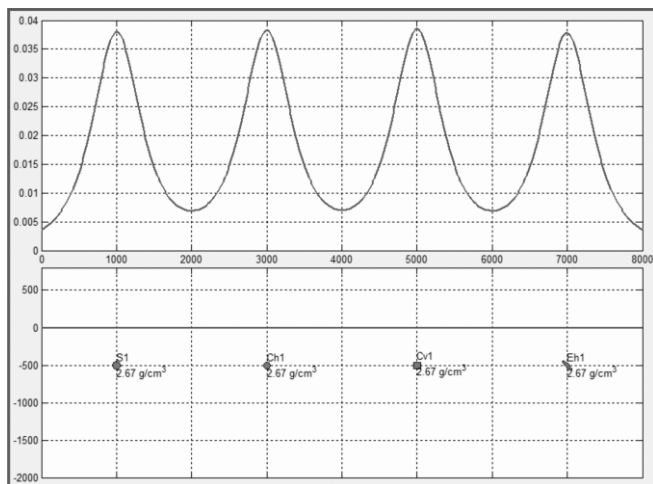
8.1.1. Двумерни и 2½-мерни модели

Симетрични на профила X крайни модели

За базов модел е избрано сферично тяло (S) с обемна плътност $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$, радиус $R = 50 \text{ m}$ и обем $V = 523598,776 \text{ m}^3$. Тестовите са проведени като е сравнен максимум на аномалията Δg_{max} над центъра на сферата с максимумите на аномалиите на хоризонтален кръгов цилиндър (Ch: $R = 43,679 \text{ m}$; $d = 87,358 \text{ m}$), вертикален кръгов цилиндър (Cv: $R = 43,679 \text{ m}$; $d = 87,358 \text{ m}$) и хоризонтален елиптичен цилиндър (Eh: $b = 87,358 \text{ m}$; $c = 21,840 \text{ m}$; $2l = 87,358$; $\gamma = 45^\circ$), имащи същата плътност като сферата (табл. 2.4). Всички геометрични обекти са моделирани така, че да са близки по форма и да имат един и същи обем $V = 523598,776 \text{ m}^3$. Сравненията са направени за няколко различни дълбочини H като за целта е съблюдаван принципът, масовият център на телата да съвпадат с този на базовата сфера. Нивата на сравнение са избрани така, че да са на значителна дълбочина спрямо техните размери, тъй като по този начин се преодоляват геометричните различия и особености на отделните тела, т.е. възприемат се като точкови източници.

Таблица 2.4. Сравнителна таблица на максимумите на аномалиите на симетрични на профила X крайни модели с максимума на модела на сферично тяло.

| H, m | S | Ch | S-Ch | Cv | S-Cv | Eh | S-Eh |
|--------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|
| -500 | 3,73E-02 | 3,71E-02 | 1,42E-04 | 3,74E-02 | -6,939E-05 | 3,72E-02 | 1,45E-04 |
| -2500 | 1,49E-03 | 1,49E-03 | 2,28E-07 | 1,49E-03 | -1,14E-07 | 1,49E-03 | 2,28E-07 |
| -5000 | 3,73E-04 | 3,73E-04 | 1,42E-08 | 3,73E-04 | -7,12E-09 | 3,73E-04 | 1,42E-08 |
| -7500 | 1,66E-04 | 1,66E-04 | 2,81E-09 | 1,66E-04 | -1,41E-09 | 1,66E-04 | 2,81E-09 |
| -10000 | 9,33E-05 | 9,33E-05 | 8,90E-10 | 9,33E-05 | -4,45E-10 | 9,33E-05 | 8,90E-10 |



Фигура 2.31. Визуално сравнение на аномалното поле на сравнително близки по форма тела с еднакви маси разположени на еднаква дълбочина (от ляво надясно: сфера, хоризонтален цилиндър, вертикален кръгов цилиндър, елиптичен цилиндър).

8.1.2. Триизмерни модели

Всички триизмерни модели от системата СИМИНГРАН са сравнени с аномалията на сфера (S) с обемна плътност $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$, радиус $R = 50 \text{ m}$ и обем $V = 523598,776 \text{ m}^3$, т.е. същите параметри като при тестовите със симетрични двумерни обекти. Резултатите са представени в таблицата по-долу като са спазени същите принципи за моделиране описани по-горе. Еквивалентността на обема, респ. масата на телата е запазена една и съща като са използвани подходящи параметри. Сравнени са следните тела: хоризонтален ограничен кръгов цилиндър (Ch: $R = 43,679 \text{ m}$; $d = 87,358 \text{ m}$; $\alpha = 15^\circ$), вертикален кръгов цилиндър (Cv: $R = 43,679 \text{ m}$; $d = 87,358 \text{ m}$), хоризонтална многоъгълна призма (Ph: страни – 4; $t = 80,6 \text{ m}$; $L = 80,6 \text{ m}$); вертикална многоъгълна призма (Pv: страни – 4; $t = 80,6 \text{ m}$; $H = 80,6 \text{ m}$); наклонена правоъгълна призма (Pd: $a = 80,6 \text{ m}$; $b = 80,6 \text{ m}$; $H = 80,6 \text{ m}$; $\varphi = 88^\circ$); триосен елипсоид (Ei: $a = 51,0 \text{ m}$; $b = 50,02 \text{ m}$; $c = 49 \text{ m}$; $\alpha = 15^\circ$; $\delta = 5^\circ$; $\gamma = 355^\circ$); удължен елипсоид (Ep: $a = 51,0 \text{ m}$; $b = 48,058 \text{ m}$; $\alpha = 15^\circ$; $\delta = 5^\circ$); сплеснат елипсоид (Eo: $a = 49,0 \text{ m}$; $b = 52,062 \text{ m}$; $\alpha = 15^\circ$; $\delta = 5^\circ$).

Таблица 2.5. Сравнителна таблица на максимумите на аномалиите на триизмерните модели в СИМИНГРАН с максимума на модела на сфера.

| H, m | S | Ch | S-Ch | Cv | S-Cv |
|--------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| -500 | 3,7321E-02 | 3,7180E-02 | 1,4160E-04 | 3,7391E-02 | -6,9295E-05 |
| -2500 | 1,4928E-03 | 1,4926E-03 | 2,2780E-07 | 1,4930E-03 | -1,1380E-07 |
| -5000 | 3,7321E-04 | 3,7320E-04 | 1,4240E-08 | 3,7322E-04 | -7,1184E-09 |
| -7500 | 1,6587E-04 | 1,6587E-04 | 2,8129E-09 | 1,6587E-04 | -1,4064E-09 |
| -10000 | 9,3303E-05 | 9,3302E-05 | 8,9003E-10 | 9,3304E-05 | -4,4481E-10 |

Продължение от табл. 2.5.

| H, m | Ph | S-Ph | Pv | S-Pv | Pd | S-Pd |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| -500 | 3,7319E-02 | 1,8305E-06 | 3,7319E-02 | 1,8305E-06 | 3,7319E-02 | 2,3301E-06 |
| -2500 | 1,4928E-03 | 1,1763E-10 | 1,4928E-03 | 1,1766E-10 | 1,4928E-03 | 1,0334E-09 |
| -5000 | 3,7321E-04 | 1,8490E-12 | 3,7321E-04 | 1,8881E-12 | 3,7321E-04 | 6,0017E-11 |
| -7500 | 1,6587E-04 | 1,6617E-13 | 1,6587E-04 | 2,2111E-13 | 1,6587E-04 | 1,1702E-11 |
| -10000 | 9,3303E-05 | 3,1363E-14 | 9,3303E-05 | 1,1310E-13 | 9,3303E-05 | 3,7362E-12 |

Продължение от табл. 2.5.

| H, m | Ei | S-Ei | Ep | S-Ep | Eo | S-Eo |
|--------|------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|
| 1 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| -500 | 3,7321E-02 | -8,9600E-08 | 3,7334E-02 | -1,2760E-05 | 3,7308E-02 | 1,3533E-05 |
| -2500 | 1,4928E-03 | -1,4107E-10 | 1,4929E-03 | -2,0404E-08 | 1,4928E-03 | 2,1666E-08 |
| -5000 | 3,7321E-04 | -8,3373E-12 | 3,7321E-04 | -1,2753E-09 | 3,7321E-04 | 1,3544E-09 |
| -7500 | 1,6587E-04 | -1,3621E-12 | 1,6587E-04 | -2,5190E-10 | 1,6587E-04 | 2,6458E-10 |
| -10000 | 9,3303E-05 | -6,7117E-15 | 9,3303E-05 | -7,9701E-11 | 9,3303E-05 | 8,0722E-11 |

8.1.3. Обобщение на резултатите от тестовете за решаване на правата задача

От проведените тестове и получените резултати става ясно, че когато изследваните модели са разположени на големи разстояния от наблюдателната точка разликите в стойностите на максимумите на създаваните от тях аномалии са незначителни. С намаляване на дълбочините на масовите центрове на обектите тези разлики постепенно се увеличават, но порядъкът им остава далеч под възможната стандартна сумарна грешка на съвременните измервания и апаратурни възможности.

Представените тук и в дисертационния труд примери, както и редица други тестове, могат да послужат като доказателство за това, че аналитичните изрази и алгоритми използвани за решаване на правата гравиметрична задача са достоверни, надеждни и отсъстват груби технически грешки в разработения програмен код.

8.2. Тестване на алгоритмите за решаване на обратната гравиметрична задача

За реализиране на изпитателните тестове, имащи за цел да изследват възможностите на автоматизираната система *СИМИНГРАН* за решаване на обратната гравиметрична задача, бяха съблюдавани няколко основни подготвителни стъпки:

- Създаване на 4 бр. (два двумерни и два триизмерни), отличаващи се по сложност синтетични гравиметрични модели и изчисляване на гравитационния им ефект на земната повърхност (или на нулевото ниво);
- Зашумяване на част от тестовете гравитационни аномалии с различни нива на шум (3%, 5%, 7%), с цел пресъздаване на данни от реални измервания;
- Създаване на подходящи за работа в *СИМИНГРАН* входни файлове във формат от вида GRD Surfer 6 Text Grid (*.grd) за примерната и DAT XYZ (*.dat) за двумерната задача.

Подготвените по този начин данни са интегрирани в системата *СИМИНГРАН*, след което чрез използване на разнообразни тела е създадено първо приближение на модела. Последвалата автоматична оптимизация е извършена при различни начални параметри. Получените резултати са анализирани визуално и чрез пресмятането на някои характерни числени оптимизационни параметри представени накратко по-долу.

8.2.1. Параметри за оценка на оптимизацията

При оптимизацията на полето на теоретичен (синтетичен) модел, обикновено параметрите на, създаващите аномалията смутители са известни. Ако при решаването на обратната задача интерпретацията е извършена с тела от вида използван в синтетичния модел е възможно лесно да бъде определено разстоянието d_Q между синтетичния q_k и оптимизирания q_l модел. То се определя чрез модула на разликовия вектор:

$$d_Q(q_k, q_l) = |\vec{q}_k - \vec{q}_l| \quad \{2.6\}$$

Сравняваните параметри q се намират в n -мерното евклидово пространство Q на параметрите на двата модела и се разглеждат като точки или радиус-вектори и могат да бъдат геометрични (особени точки, обем и др.) или физични (плътност, маса и др.).

Подобно на горния критерий, стойностите Δg на зададеното поле и изчисляваните в процеса на подбора моделни стойности Δg_m на оптимизираното поле се разглеждат като точки или радиус-вектори в n -мерно евклидово пространство G с разстояние d_G между тях определено чрез разликовия вектор:

$$d_G(\Delta g_i, \Delta g_{m,i}) = \sum_{i=1}^n |\Delta g_i - \Delta g_{m,i}| \quad \{2.7\}$$

Квадратът на това разстояние, който всъщност, представлява нормата на разликовото поле между аномалните стойности Δg и оптимизираните чрез модела q_i стойности Δg_m на полето, се пресмята с израза:

$$F(q) = \sum_{i=1}^n [\Delta g_i - \Delta g_{m,i}(q)]^2, \quad \{2.8\}$$

а от функцията $F(q)$ се определя средноквадратичната разлика между двете полета изчислена по формулата:

$$s(q) = \sqrt{\frac{F(q)}{n}}. \quad \{2.9\}$$

8.2.2. Примерни тестове за решаване на обратната гравиметрична задача

Създадени са четири основни тестови модела (табл. 2.8), за които е решена обратната гравиметрична задача, чрез използване на разнообразни приближения. Получените резултати са анализирани и сравнени с изходния синтетичен модел.

Таблица 2.6. Параметри на изходните синтетични модели използвани за тестване на алгоритмите за решаване на обратната гравиметрична задача.

| | Модел I | Модел II | Модел III | Модел IV |
|------------------------|---|--|---|--|
| Дименсия | 2D | 2D | 3D | 3D |
| Координатни оси | X = 1000 m | X = 2000 m | Y = 1000 m X = 1000 m | Y = 1300 m X = 1300 m |
| Релеф | не | да | не | да |
| Стъпка | $\Delta x = 20$ m | $\Delta x = 20$ m | $\Delta y = \Delta x = 20$ m | $\Delta y = \Delta x = 20$ m |
| Брой тела в модела | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Вид на телата в модела | <ul style="list-style-type: none"> • Хоризонтална петогоълна призма (Ph)¹ | <ul style="list-style-type: none"> • Хоризонтален цилиндър (Ch)² • Вертикален праг (St)³ | <ul style="list-style-type: none"> • Сфера (S)⁴ | <ul style="list-style-type: none"> • Хоризонтален цилиндър (Ch)⁵ • Трапецoid (Tr)⁶ |
| Зашумяване на данните | 0%, 3%, 5%, 7% | 0%, 3%, 5%, 7% | 0%, 5% | 0%, 3%, 5% |
| Оптимизационни тестове | 3 | 1 | 2 | 1 |

¹ Ph: $a_1 = 365$ m, $b_1 = -83$ m; $a_2 = 454$ m, $b_2 = -60$ m; $a_3 = 577$ m, $b_3 = -79$ m; $a_4 = 714$ m, $b_4 = -171$ m; $a_5 = 494$ m, $b_5 = -161$ m; $\rho_{\text{эф}} = 2,670$ g/cm³; S = 20 221 m².

² Ch: $x_0 = 700$ m, $z_0 = 800$ m; R = 100, l = $\pm\infty$; $\rho_{\text{эф}} = 0,352$ g/cm³; S = 31416 m², $M_{\text{эф}} = 11\,058$ kg/m.

³ St: $a_1 = 1000$ m, $b_1 = 700$ m; $a_2 = +\infty$, $b_2 = 600$ m; $\rho_{\text{эф}} = 0,221$ g/cm³.

⁴ S: $y_0 = 500$ m, $x_0 = 500$ m, $z_0 = -300$ m; R = 200; $\rho_{\text{эф}} = 0,2$ g/cm³; S = 502 655 m², $M_{\text{эф}} = 6\,702\,064\,328$ kg/m.

⁵ Ch: $y_0 = 320$ m, $x_0 = 855$ m, $z_0 = -260$ m; R = 58, 2l = 480 m; $\rho_{\text{эф}} = 0,240$ g/cm³; V = 5 072 792 m³; $M_{\text{эф}} = 1\,217\,470\,198$ kg/m.

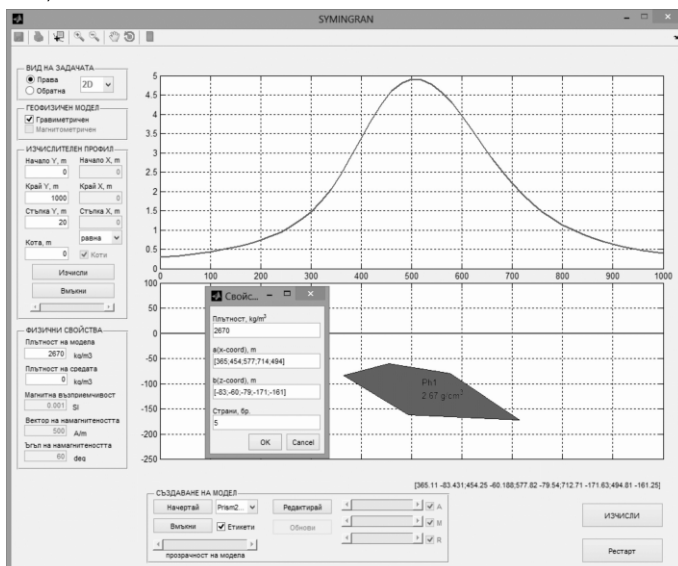
⁶ Tr: $a_1 = 795$ m, $c_1 = 395$ m, $z_1 = -200$ m, $a_2 = 895$ m, $b_2 = 735$ m, $z_2 = -300$ m; $\alpha_1 = 60^\circ$, $\alpha_2 = -45^\circ$; $\rho_{\text{эф}} = 0,2$ g/cm³; V = 6 081 495 m³; $M_{\text{эф}} = 1\,216\,299$ kg/m.

Представените оптимизационни задачи са решени на персонален компютър, работещ под Windows8 с инсталирани MATLAB R2012b, Surfer 10 и Office 2013, със следните базови характеристики:

- CPU: Intel Core2 Duo E8600 @ 3.33 GHz
- VGA: NVIDIA GeForce GT 430
- RAM: 2 X 2048
- HDD: 1500 GB + 250 GB

Модел I

Изчислено е аномалното поле на хоризонтална петоъгълна призма по профил X (виж табл. 2.6 и фиг. 2.32). Данните са зашумени с три нива на шум определени спрямо максимума на аномалията. Проведени са серия от оптимизационни тестове като източникът на аномалията е апроксимиран с модела на хоризонтална петоъгълна призма, модела на наклонен пласт и модела на елиптичен цилиндър. За всеки от използваните моделите е решена индивидуално обратната гравиметрична задача за всички нива на шум на аномалното поле и при прилагане на двата алгоритъма за минимизация на разликвата функция – методът на Левенберг-Марквард (ЛМ) и методът на доверителната област (ДО). Началната точка на автоматизираната оптимизация (първото приближение) е използвана една и съща за всички тестове в рамките на един геометричен модел като плътността е избрана равна на тази на изходния синтетичен модел. Резултатите са представени в табличен (табл. 2.9) и графичен (фиг. 2.50а,б,в) вид.



Фигура 2.32. Външен вид и свойства на тестов Модел I (хоризонтална петоъгълна призма), за който е решена правата гравиметрична задача.

От изложените в табл. 2.7 резултати е видно, че при известна ефективна плътност на аномалообразуващите тела, задачата се решава успешно с използването на различни геометрични модели. Най-добро съвпадение между източника и оптимизирания модел се наблюдава при нулеви нива на шум и апроксимация с тяло от същия вид при оптимизация по метода ДО. Като цяло при експеримента с хоризонтална петогоълна призма при различни нива на шум методът ДО дава по-стабилни и реалистични резултати, въпреки наблюдаваното минимално предимство на метода на ЛМ по отношение на минимизацията на функционала $F(q)$ и съответствието на масите.

Таблица 2.7. Сравнителна таблица за резултатите от решението на обратната гравитетрична задача за Модел 1 при избор на различни модели на апроксимация, оптимизационни алгоритми и ниво на зашуменост на данните.

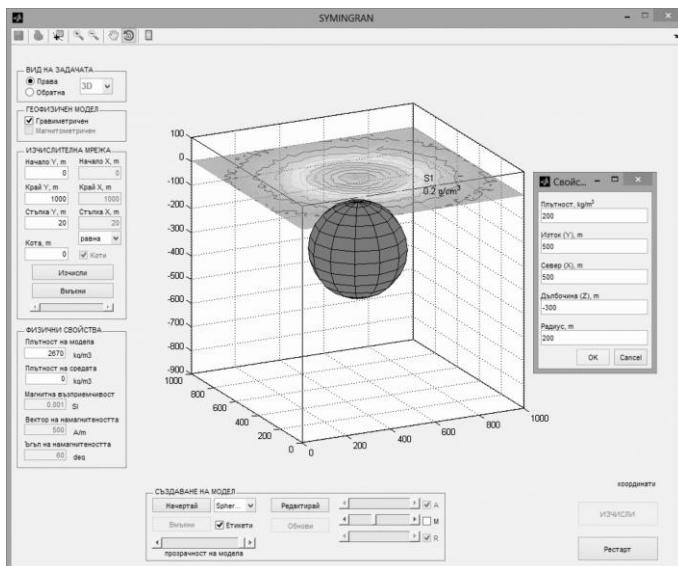
| Модел на апроксимация | Метод на оптимизация | Ниво на шум | Време за оптимизация [s] | Брой итерации | Причина за прекратяване (съгл. табл. 2.3) | d_0 [m] | $F(q)$ [mGal ²] | $\varepsilon(q)$ [mGal] | Отклонение от масата на синтетичния |
|---------------------------------|----------------------|-------------|--------------------------|---------------|---|-----------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Хоризонтална петогоълна призма | ДО | 0% | 48,0 | 43 | 3 | 64,65 | 7,92E-06 | 3,94E-04 | 0,05% |
| | ЛМ | 0% | 58,2 | 55 | 4 | 359,23 | 2,28E-04 | 2,12E-03 | -0,03% |
| | ДО | 3% | 85,1 | 80 | 3 | 574,93 | 1,86E-01 | 6,03E-02 | -0,96% |
| | ЛМ | 3% | 38,3 | 33 | 3 | 925,15 | 1,90E-01 | 6,10E-02 | -1,37% |
| | ДО | 5% | 63,6 | 60 | 3 | 84,59 | 1,59E-01 | 5,58E-02 | 0,25% |
| | ЛМ | 5% | 88,6 | 82 | 3 | 978,31 | 1,51E-01 | 5,44E-02 | 0,41% |
| | ДО | 7% | 45,6 | 44 | 3 | 321,06 | 4,70E-01 | 9,60E-02 | 2,20% |
| | ЛМ | 7% | 67,4 | 61 | 4 | 991,18 | 3,97E-01 | 8,82E-02 | 0,50% |
| Наклонен пласт | ДО | 0% | 10,2 | 11 | 3 | - | 1,64E-02 | 1,79E-02 | -0,21% |
| | ЛМ | 0% | 11,9 | 12 | 3 | - | 1,64E-02 | 1,79E-02 | -0,21% |
| | ДО | 3% | 9,7 | 10 | 3 | - | 2,25E-01 | 6,64E-02 | -1,26% |
| | ЛМ | 3% | 9,8 | 10 | 3 | - | 2,25E-01 | 6,64E-02 | -1,26% |
| | ДО | 5% | 10,4 | 11 | 3 | - | 1,82E-01 | 5,97E-02 | -0,37% |
| | ЛМ | 5% | 10,4 | 11 | 3 | - | 1,82E-01 | 5,97E-02 | -0,37% |
| | ДО | 7% | 11,1 | 12 | 3 | - | 4,86E-01 | 9,76E-02 | 1,64% |
| | ЛМ | 7% | 10,7 | 11 | 3 | - | 4,86E-01 | 9,76E-02 | 1,64% |
| Хоризонтален елиптичен цилиндър | ДО | 0% | 7,2 | 7 | 3 | - | 4,10E-03 | 8,97E-03 | -0,33% |
| | ЛМ | 0% | 8,7 | 9 | 4 | - | 4,10E-03 | 8,97E-03 | -0,33% |
| | ДО | 3% | 6,3 | 6 | 3 | - | 2,32E-01 | 6,74E-02 | -1,49% |
| | ЛМ | 3% | 8,3 | 8 | 3 | - | 2,32E-01 | 6,74E-02 | -1,49% |
| | ДО | 5% | 7,0 | 7 | 3 | - | 1,63E-01 | 5,65E-02 | -0,38% |
| | ЛМ | 5% | 7,8 | 7 | 4 | - | 1,63E-01 | 5,65E-02 | -0,38% |
| | ДО | 7% | 7,8 | 7 | 3 | - | 5,23E-01 | 1,01E-01 | 0,91% |
| | ЛМ | 7% | 8,9 | 9 | 3 | - | 5,23E-01 | 1,01E-01 | 0,91% |

Модел II

Подробно описание на експеримента е представено в дисертационния труд!

Модел III

За провеждане на теста е решена правата задача за сфера с радиус $R = 200$ m и обем $V = 33\,510\,322$ m³. Центърът на сферата $S1(x_c, y_c, z_c)$ е разположен на дълбочина $h = -300$ m, намираща се в средата на координатна мрежа с размери 1000×1000 m при разстояние между наблюдателните точки $\Delta x = \Delta y = 20$ m и ефективна плътност $\rho_{\text{еф}} = 0,2$ g/cm³ (фиг. 2.33).



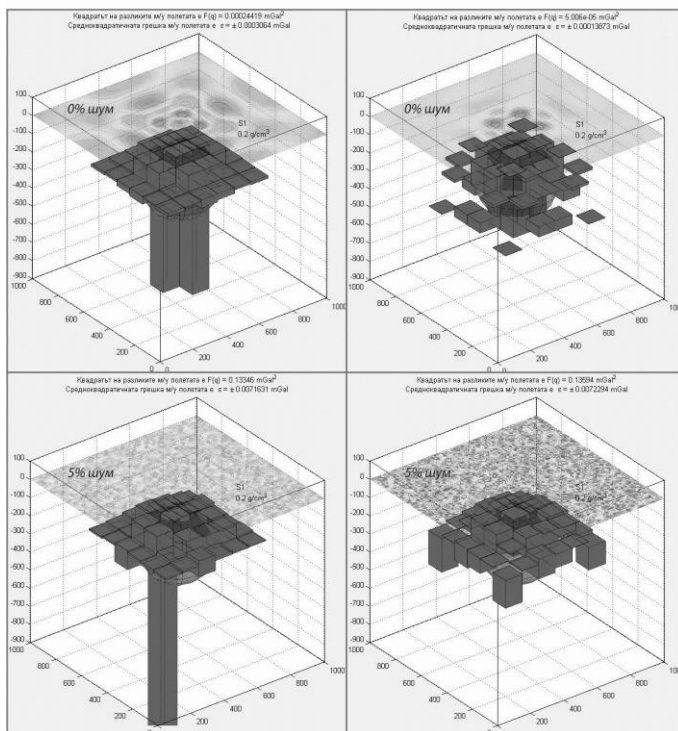
Фигура 2.33. Външен вид и свойства на тестов Модел III (триизмерен модел на сфера), за който е решена правата гравиметрична задача.

Тест1

Резултантната гравитационна аномалия на сферата е използвана за решаване на обратната гравиметрична задача като долното полупространство в обширна област около нейния максимум ($X = 200 : 800$; $Y = 200 : 800$) е запълнено плътно с $6 \times 6 = 36$ призми със страна 100×100 m. При така моделираното първо приближение призмите са зададени с ефективна плътност като тази на сферичния модел, а горнището и долнището им са съответно на кота 0 и -600 m. При последвалото решение на обратната задача $\rho_{\text{еф}}$ и координатите на призмите по осите X и Y са фиксирани, а вертикалните координати са ограничени до нулевото равнище. Броят на оптимизираните променливи е 36. Освен полето на синтетичната гравитационна аномалия, оптимизацията е извършена и при 5% добавен шум като за целта са приложени и сравнени и двата оптимизационни алгоритъма.

Метод на доверителната област

Метод Левенберг-Марквард



Фигура 2.34. Вариантни решения на обратната гравиметрична задача на тестов Модел III-тест 1 при 0% и 5% шум за двата оптимизиращи алгоритъма (ДО и ЛМ).

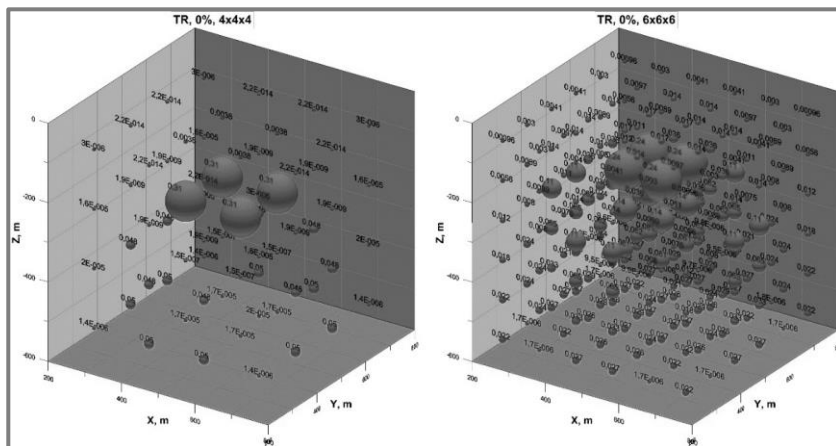
Таблица 2.8. Сравнителна таблица за резултатите от решението на обратната гравиметрична задача за Модел III-тест1 при различни нива на шум.

| Метод на оптимизация | Ниво на шум | Време за оптимизация [s] | Брой итерации | Причина за прекратяване (съгл. табл. 2.3) | $F(q)$ [mGal ²] | $\varepsilon(q)$ [mGal] | d_0 [kg] | Отклонение от масата на синтетичния източник [%] |
|----------------------|-------------|--------------------------|---------------|---|-----------------------------|-------------------------|------------|--|
| ДО | 0% | 1019,4 | 31 | 3 | 2,44E-04 | 3,06E-04 | 2,84E+08 | 4,24% |
| ЛМ | 0% | 3144,6 | 98 | 0 | 5,01E-05 | 1,39E-04 | 1,02E+07 | 0,15% |
| ДО | 5% | 2870,4 | 54 | 3 | 1,33E-01 | 7,16E-03 | 1,03E+09 | 15,35% |
| ЛМ | 5% | 5146,8 | 97 | 0 | 1,36E-01 | 7,23E-03 | -5,61E+08 | -8,38% |

От визуалния анализ на получените решения (фиг. 2.35) се вижда, че след оптимизацията, призмите в модела са заели форма близка до изометричната, подобно на аномалообразуващия обект от синтетичния модел – сферата. Разположените в зоната на максимума на аномалното гравитационно поле тела са с най-голяма височина като тя намалява радиално с отдалечаване от него. Поради по-голямата си близост до наблюдателната мрежа, горните граници на призмите са определени по-точно и се доближават най-добре до формата на оригиналния смутител, докато долните са по-неточни като при метода на ДО за някои тела това отклонение е значително. Оптимизацията на разположените по периферията на модела призмиди, напротив, е по-лоша при метода ЛМ.

Тест 2

Гравитационната аномалия от предишния тест е използвана за решаване на втора тестова задача. Тук част от долното полупространство с параметри $X = 200 \div 800$ m; $Y = 200 \div 800$ m; $Z = 0 \div -600$ m е запълнено с неподвижни кубични призмиди подредени по трите оси на координатната система. Създадени са три различни моделни варианти, отличаващи се по броя кубчета и дължината на страната на единичното кубче, а именно: 1) $3 \times 3 \times 3 = 27$ бр. със страна на кубчето 200 m; 2) $4 \times 4 \times 4 = 64$ бр. със страна 150 m; 3) $6 \times 6 \times 6 = 216$ бр. със страна 100 m (фиг. 2.53). И в трите случая ефективната плътност е еднаква за всички кубчета и съвпада с тази на изходния сферичен модел. При решението на обратната задача координатите на кубчетата са фиксирани, така че да са абсолютно неподвижни. Единственият оптимизиран параметър е ефективната плътност. Броят на оптимизираните променливи отговаря на броя на кубчетата във всеки експеримент. При този тест е решен зашумен вариант (5%) на обратната задача единствено за първия вариант, за който са използвани и двата оптимизационни алгоритъма. При другите два варианта оптимизацията е осъществена единствено с помощта на метода на доверителната област (фиг. 2.36).



Фигура 2.35. Графично представяне на решението на обратната задача за тестов Модел III-тест 2, чрез сфери разположени на местата на кубчетата и диаметър пропорционален на стойността на оптимизираната ефективна плътност за: вариант 2 (ляво) и вариант 3 (дясно).

Таблица 2.9. Сравнителна таблица за резултатите от решението на обратната гравиметрична задача за Модел III-тест2.

| Моделен вариант | Метод на оптимизация | Ниво на шум | Време за оптимизация [s] | Брой итерации | Причина за прекратяване (съгл. табл. 2.3) | $F(q)$ [mGal ²] | $\varepsilon(q)$ [mGal] | d_0 [kg] | Отклонение от масата на синтетичния източник [%] |
|-----------------|----------------------|-------------|--------------------------|---------------|---|-----------------------------|-------------------------|------------|--|
| 1 | ДО | 0% | 128,9 | 9 | 1 | 3,20E-02 | 3,51E-03 | 4,86E+07 | 0,72% |
| 1 | ЛМ | 0% | 109,3 | 7 | 1 | 6,37E-05 | 1,56E-04 | -4,56E+08 | -6,80% |
| 1 | ДО | 5% | 173,0 | 9 | 1 | 1,60E-01 | 7,85E-03 | 5,72E+07 | 0,85% |
| 1 | ЛМ | 5% | 147,7 | 6 | 3 | 1,33E-01 | 7,16E-03 | -4,69E+08 | -7,00% |
| 2 | ДО | 0% | 951,8 | 18 | 1 | 1,33E-02 | 2,26E-03 | 1,58E+08 | 2,35% |
| 3 | ДО | 0% | 7222,9 | 14 | 3 | 9,51E-04 | 6,05E-04 | 1,20E+07 | 0,18% |

Резултатите от теста са представени на фиг. 2.36 (частично) и в табл. 2.10. Вижда се, че при линейния вариант на обратната задача резултатите са по-добри, което се изразява в сравнително краткото време за достигане на оптимизационен минимум, както и в по-голямата близост на масата на оптимизирания модел до тази на сферата. Графично представените на фиг. 2.36 оптимизирани ефективни плътности показват една тенденция към добро пространствено съвпадение на по-плътните кубчета с реалното разположение на изходния модел. С увеличаване броя на кубчетата, т.е. съгъстяването им в пространството, се постигат по-точни и надеждни резултати, което обаче е за сметка на компютърното време.

Модел IV

Подробно описание на експеримента е представено в дисертационния труд!

8.3. Кратки изводи и заключения от проведените тестове

От проведените тестове и последвалите анализи на резултатите могат да бъдат направени няколко важни изводи за разработената интерактивна система СИМИНГРАН:

- Системата дава възможност за създаването на практически неограничен набор от двумерни и триизмерни гравиметрични физико-геоложки модели, за които да бъде изчислено съответното аномално гравитационно поле;
- Написаните и интегрирани в системата алгоритми и програми позволяват да бъде решена обратната гравиметрична задача в рамките на произволен или избран на базата на допълнителна информация физико-геоложки модел;
- Решаването на обратната гравиметрична задача се осъществява в интерактивен режим, чрез редуване на интерактивна и автоматизирана оптимизация като по този начин се осъществява контрол върху процеса и е възможно добавянето на допълнителна информация във всеки един етап от интерпретацията;
- Въпреки проявата на някои незначителни „бъгове“, следва заключението, че СИМИНГРАН успешно може да бъде използвана за решаване на правата и обратна двумерна и триизмерна гравиметрична задача в интерактивен режим.

Глава III. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА ГРАВИТАЦИОННИ АНОМАЛИИ В ИНТЕРАКТИВЕН РЕЖИМ ОТ РАЙОНА НА гр. ПРОВАДИЯ

9. Кратка обяснителна записка към практическата задача

Разработените в дисертационния труд алгоритми и програми за интерпретация на гравитационни аномалии в интерактивен режим, реализиращи метода на регуляризацията в рамките на даден модел, са използвани при решаването на проучвателна геофизична задача от колектив към катедра „Приложна геофизика“, с прякото участие на автора, на тема: **„Извършване на високоточна гравиметрична снимка в М 1:10 000 върху 40 km² в района на с. Манастир, община Провадия. Обработка, анализ и интерпретация на данните“.**

Основните цели поставени пред проведените гравиметричните проучвания в района са:

- Съставяне на Карта на аномалиите Буге в мащаб 1: 10 000 в района на с. Манастир в мащаб 1:10 000 върху площ от 40 km²;
- Анализ на аномалното гравитационно поле и качествена оценка на източниците които го създават;
- Количествена интерпретация на аномалиите и съставяне на оптимизационен модел на геоложката среда в пределите на изследваната площ;
- Геолошко осмисляне на получените резултати.

С тяхното реализиране ще стане възможно решаването на основните задачи пред геоложките проучвания в района, а именно: създаване на рекогносцировъчна основа за проектиране на детайлни сеизмични проучвания; отговор на въпроса дали съществуват съседни на основното Мировското солно тяло, генетически свързани с него солни тела, които представляват интерес за добива.

10. Общи сведения за площ „Манастир“

Площ „Манастир“ (фиг. 3.1) е разположена в района на с. Добриня, с. Житница и с. Манастир, община Провадия, обл. Варна.

Таблица 3.1. Координати на характерните точки на площ „Манастир“.

| Номер на точка | Координатна система 1970 | | Координатна система WGS84 | |
|----------------|--------------------------|---------|---------------------------|-------------|
| | X (m) | Y (m) | B | L |
| 1 | 4678639 | 9602955 | 43°08'57.44 | 27°27'10.52 |
| 2 | 4685002 | 9602955 | 43°12'23.60 | 27°27'14.66 |
| 3 | 4605002 | 9609872 | 43°12'20.19 | 27°32'21.03 |
| 4 | 4677180 | 9609872 | 43°08'06.76 | 27°32'15.59 |
| 5 | 4677212 | 9606513 | 43°08'09.48 | 27°29'47.01 |
| 6 | 4678580 | 9605076 | 43°08'54.51 | 27°28'44.34 |

Площ „Манастир“ обхваща малка част от западните предели на Добринското плато, характеризираща се с надморска височина от 330 m на северозапад до 45 m на североизток. Повърхността е плоско-хълмиста с генерален наклон от северозапад на югоизток, към долината на р. Провадийска, която е главната отводнителна артерия. Усложнена е от сравнително плитки долини на две малки рекички – Наждак дере в централната и р. Манастирска – в източната част на площта. Източно от Наждак дере повърхността на площта е усложнена от възвишението Коджатепе, изтеглено в посока ЮЗ-СИ, почти успоредно на

споменатото дърво, с височина 50-60 м. Източно от него релефът е усложнен от долината на р. Манастирска, която има същата посока, както тази на Наждак дърво. Особено стръмни са северните разклонения на тази река. Левият ѝ бряг в югоизточната част на площта е също със стръмни склонове.



Фигура 3.1. Обзорна аероснимка на района на гравиметричните проучвания с контур и характерни точки на площ „Манастир“.

11. Кратка геоложка характеристика на площ „Манастир“

Седиментните скали разкриващи се на повърхността в Провадийско са стратиграфрани от различни изследователи: Цанков, 1937, 1943; Цанков и др., 1952; Йолкичев, 1989; Аладжова-Хрисчева, 1991. При съставянето на геоложката карта на България в М 1:100 000 стратиграфирането е извършено на основата на литостратиграфския принцип (Миланова & Чешитев, 1992; Чешитев, Миланова, Попов & Коюмджиева, 1994). Особено ценна е информацията за литологията и стратиграфията в отчета за каменосолното находище „Мирово“ (Монахов, 1998), където е направена корелация между естествените разкрития и данните от дълбоките сондажи.

По-подробен преглед на литолого-стратиграфските характеристики, тектониката, хидрогеоложките особености и полезните изкопаеми в района на площ „Манастир“ е направен в дисертационния труд.

12. Гравитационни проучвания в мащаб 1:10 000 в района на с. Манастир, Провадийска община и интерпретация на данните

Проучванията включват извършване на гравиметрична площна снимка в района на с. Манастир, Провадийска община по зададен профил и площна снимка в М 1:10 000 – полеви измервания, обработка на данните, представяне и анализ на резултатите.

Измерванията са реализирани с гравиметър ГР/К2 No 1319 със стойност на едно деление 11,1063 mGal при температура 27,8°C. За всяка точка са вземани по три отчета като средният е използван при обработката. Точността на гравиметричните измервания е около $\pm 0,2$ mGal.

За привързване на данните от измерванията е използвана базова точка (БТ). За отчитане на нул-пункта на гравиметъра освен базовата точка е използвана и една опорна точка (ОТ₁), привързана към базовата чрез няколкократно измервания. Опорната точка съвпада с точка № 74 от профила.

12.1. Общи сведения за извършените гравиметрични изследвания

Въз основа на данните от измерванията (средните отчети и времето) е извършен първия етап на обработката, при който се получават относителните стойности на силата на тежестта Δg спрямо избраната базова точка.

За преминаване към аномалии Буге е внесена комбинираната поправка за свободен въздух и междинен материален слой. За изчисляването на тази поправка са използвани, както следва:

- надморските височини на всички точки, получени чрез интерполация от картата в М 1:10 000;
- плътността на междинния слой е определена на 2,35 g/cm³ и е приета като средна за скалите с дебелина 30 – 200 m (от морското ниво, към което се извършва редуцирането до съответните надморски височини на измервателните точки).

Относителното разпределението на силата на тежестта (гравитационното поле) е представено на фиг. 3.2. Анализът и интерпретацията на построената карта позволява да се направят следните основни изводи:

- в границите на изследвания планшет отсъства локална аномалия;
- оформя се много добре изразен фрагмент на негативна аномалия, която се ориентира в североизточна посока. Убедително може да се твърди, че тази аномалия представлява фрагмент от Мировското солно тяло.

Съставянето на обобщени вариантни плътностни модели се ограничава от два основни фактора:

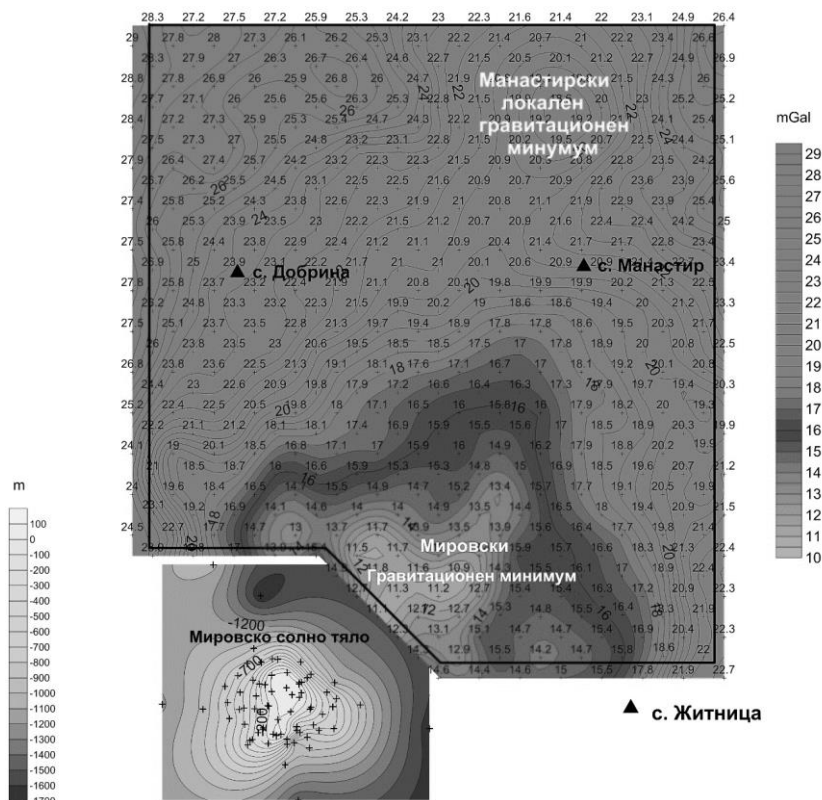
- изследваният планшет е с относително малки размери;
- геоложкият разрез на изследвания район е слабо изучен.

За изчерпателно представяне на наличната информация за разпределение на гравитационното поле в района на с. Манастир са използвани и данните от гравиметричната снимка в М 1:100 000 на част от Провадийската синклинала.

12.2. Карта на аномалиите Буге в района на с. Манастир, община Провадия

В резултат от проучванията е съставена Карта на гравитационните аномалии Буге на силата на тежестта спрямо БТ. Картата е представена на фиг. 3.2.

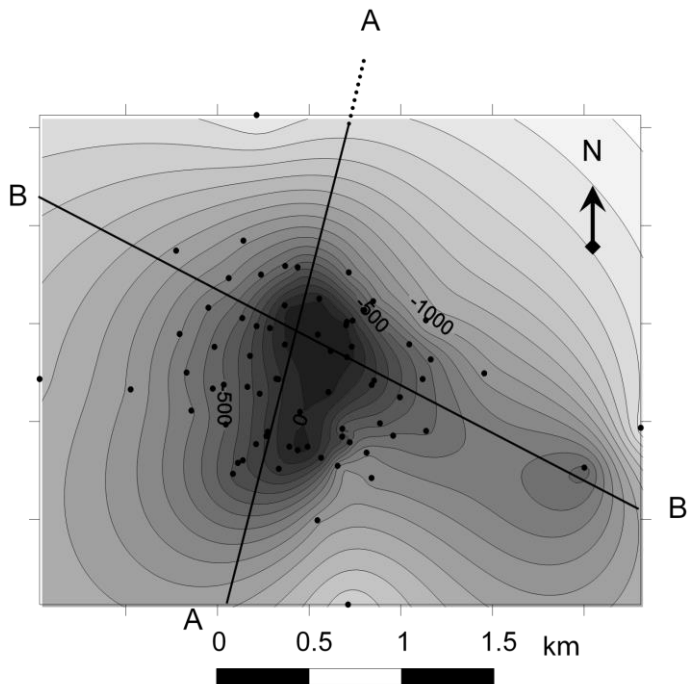
След отстраняването на регионалния фон от фундамента, разпределението на аномалното гравитационно поле в югозападната част на изследваната площ картира зона с понижена плътност, която свързваме с Мировското солно тяло (Тяло 1). Солното тяло се намира на югоизточната граница извън площта, но отрицателната му аномалия намира отражение и в пределите на изследваната площ. Прави впечатление, че отрицателната аномалия е изтеглена в североизточна посока и достига до с. Манастир. Очевидно е, че непосредствено до Мировското солно тяло има второ тяло с понижена плътност (Тяло 2), което най-вероятно е генетически свързано с Мировското. В североизточната част на картата, северно от с. Манастир се наблюдава малка отрицателна аномалия (Манастирски локален гравитационен минимум), която е идентифицирана с разпределението в геоложката среда на скали с понижени плътности (Тяло 3) или гравитационното влияние на релефните форми в тази част от планшета, тъй като в картата не е въведена поправка за релеф.



Фигура 3.2. Карта на аномалиите Буге в района на с. Манастир, с. Добриня и с. Житница, общ. Провадия (в югозападната ѝ част е поставена врезка, която представлява „Карта на горната повърхност на Мировското солно тяло по сондажни данни“).

12.3. Анализ на геоложките и сондажни данни

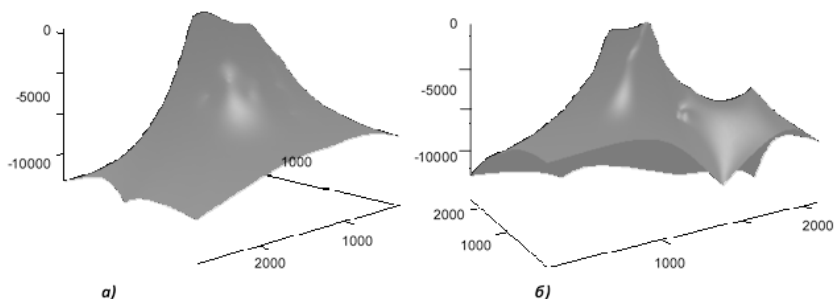
В България на около 5 km от град Провадия е открито единственото за територията на страната солно тяло – Мировското солно находище. То е разположено в пределите на Провадийското понижение на Южномизийската периплатформена зона. Мизийска платформа е изградена от седиментни скали с възраст от ранния палеозой до терциера. Тези скали са засегнати в различна степен от каледоно-херцинските, старокимерските и алпийските тектонски събития, като оформят три основни структурни етажа. Първоначалната халитова седиментация на горния перм е отложена върху морски теригенни и карбонатни скали. В резултат на старокимерската нагъвателна фаза, Мизийската платформа е дълбоко денудирана като ерозията засяга частично дори Долния триас. В последствие се отлагат небелели юрски, дебели кредни и терциерни седименти.



Фигура 3.3. Карта на повърхността на Мировското солно тяло по сондажни данни с изолинии на абсолютната дълбочина в метри и разположение на сондажите (черните точки).

Първите халитни скали на солното тяло се отлагат в един къснопермски евапоритов басейн. Възрастта на каменната сол на Мировския солен щок е генетично свързана с горния перм.

Пространственото положение на солното тяло се оформя по данните от 76 сондажа е представено на фиг. 3.3 и 3.4а,б.



Фигура 3.4. Общ вид на повърхността на Мировското солно тяло по сондажни данни в аксиометрични проекции: а – по профилна линия AA; б – по профилна линия BB (фиг. 3.3).

Солното тяло до абсолютна дълбочина около -900 m е изтеглено леко по направление на профил AA. Абсолютна дълбочина до солните образувания, в намиращ се на около 1 km югоизточно от основното тяло сондаж разположен по профил BB, е определена на -553 m. Анализирайки разпределението на аномалното гравитационно поле, логично е да се предположи, че солното тяло продължава в дълбочина и в североизточна посока. В същата посока е изтеглена и негативната гравитационна аномалия в изследвания район. Този факт дава основание да се счита, че Мировското солно тяло продължава в североизточна посока и гравитационната аномалия отразява по-ниската плътност на солта от вместващите я скали. Пространственото разположение на солното тяло, което има средна остатъчна плътност спрямо вместващите скали в рамките на $\rho_{\text{эф}} = -200 \div -300 \text{ kg/m}^3$, обуславя изтеглената на североизток гравитационна аномалия.

12.4. Анализ на преобразуванията на аномалното гравитационно поле

Анализа на аномалното гравитационно поле (аномалия Буге) в изследваната площ е извършен върху три вида преобразувания при стъпка на мрежата 0,250 km:

- 1) вариационни аномалии с радиуси 1, 2 и 3 km;
- 2) остатъчно поле от плочно аритметично усредняване при същите радиуси;
- 3) регионално гравитационно поле на височини 0,5 km, 1,0 km и 2,0 km.

Съвместният анализ на картите на трите вида преобразувания показва, че плътностните нееднородности в горната част от земната кора се характеризират с понижена плътност и контраст в интервала от -0,2 до -0,3 g/cm³, които се свързват със съдържанието на сол. Явно е, че аномалообразуващите тела са разположени на различни дълбочини. Най-плитко е разположението на отрицателната плътностна нееднородност, която се свързва с Мировското солно тяло (Тяло 1). Тя създава отрицателната Мировска гравитационна аномалия. Дълбочината до горната ѝ повърхност е малка. По сондажни данни в някои точки достига на 15 m от повърхността.

Продължението на Мировското солно тяло в североизточна посока (означено като Тяло 2) е разположено на дълбочина под 0,7 km.

Разположената в североизточна част на картата, северно от с. Манастир, малка отрицателна (Манастирска) аномалия, (Тяло 3) се създава или от разуплътнение в геоложката среда в дълбочинния интервал от 0,2 до 1,5 km, или както бе отбелязано, се дължи на влиянието на релефа на терена.

12.5. Съставяне и оптимизация на вариантни плътности интерпретационни модели за района на гр. Провадия

Разработената в катедра „Приложна геофизика” методика и програмно обезпечение за количествена интерпретация на гравитационни и магнитни аномалии (Ставрев & Радичев, 1984; Ставрев, 1985; Добрев, Ставрев & Радичев, 1988; Ставрев & Радичев, 1990; Радичев & Димовски, 2001; Цанков & Радичев, 2010a; 2010b и др.) се основава на моделното представяне на геоложките тела и техните аномални ефекти с помощта на компютър. За решаване на задачите свързани с интерпретацията на аномалното гравитационно поле в района на с. Манастир, общ. Провадия, е използван ограничен набор от моделни форми, които съобразно условията на изследването дават възможност за определяне на усреднените стойности на пространствените и морфоложките характеристики на плътностните нееднородности, които могат да бъдат възприети като геоложки тела.

Количествената интерпретация е извършена по метода на регуляризацията в рамките на съставените няколко вариантни физико-геоложки плътностни модели за района на изследваната площ.

Методиката на интерпретация включва разрешаването на следните основни задачи:

1. избор на конкретен модел, в рамките на който ще бъде извършена интерпретацията;
2. решаване на обратната задача с аналитични и графични методи с цел определяне и задаване на параметрите на модела в първо приближение;
3. решаване на правата задача с параметрите на модела в първо приближение;
4. подбор на стойностите на параметрите на модела (оптимизация на модела) за постигането на минимално разстояние между моделната и реалната аномалия в пространството на данните;
5. графично представяне на резултатите;
6. оценка на получените резултати и геоложкото им осмисляне.

12.5.1. Избор на подходящ физико-геоложки модел

Изборът на конкретен модел за количествена интерпретация на аномалното гравитационно поле от солните тела е извършен съобразно резултатите от качествената интерпретация с отчитане вида на полето и геоложкия строеж на района. Анализът на картата на аномалното гравитационно поле Буге, както и събраните сведения за петрофизичните свойства на основните видове скали, изграждащи района, ни дават основание апроксимирането на реалната геоложка среда да бъде извършено при следните основни параметри:

- Брой на телата апроксимиращи плътностните нееднородности – 3 бр.
 - Първото тяло (Тяло 1) се свързва с Мировското солно тяло, явяващо се най-крупното разуплътнено тяло изградено от сол и даващо ефекта на отрицателната гравитационна аномалия обхванала по-голямата част от картата.
 - Второто аномалообразуващо тяло (Тяло 2), което очевидно е свързано с Мировското солно тяло може да се разглежда като продължение на основното Мировско тяло в североизточна посока. Основание за изграждането на тази представа ни дава разпределението на гравитационното поле.
 - Третото аномалообразуващо тяло (Тяло 3) се свързва с локалната негативна гравитационна аномалия разположена в североизточната част на картата.

- Съществено значение за качеството на решението има зададеният физически параметър на моделните тела. При интерпретацията на аномалиите свързани със солните тела в района на Провадия, поради наличието на много сондажни данни, този параметър е оценен главно по параметричните измервания на ядковия материал като са определени най-вероятната стойност и възможния диапазон на изменение. Съществува и втори вариант за определяне на ефективната плътност – чрез многократно решаване на обратната задача с различни стойности на плътността. За оптимална се приема плътността, при която имаме най-голяма близост между гравитационната аномалия на модела и реално измерените данни. За моделите, създаващи поле с особени точки, съвпадащи с характерни точки от повърхността на тялото (пластове, блокове, контакти), е възможно по минимума на величината $S(q)$ {2.147} като функция на ефективната плътност $\rho_{\text{еф}}$ да се определи оптималната стойност на физическия параметър. Тази възможност произтича от единствеността на решението на обратната задача по отношение на особените точки (Страхов, 1972). Негативните гравитационни аномалии обуславят избор на отрицателна ефективна плътност. Основавайки се на съвместния анализ на данните от сондажните изработки и картите на преобразуванията, аномалообразуващата плътност на модела е фиксирана в интервала $[-0,325 \div -0,175]$ g/cm³.
- За отчитането на систематични смущения в данните към списъка на параметрите, свързани с моделните тела, се прибавят и съответния брой коефициенти за двумерно или тримерно описание на регионалното (фоновото) поле. Това позволява в много от практическите задачи за интерпретация на локални аномалии да се използват пряко картите на наблюдаваните аномалии. В конкретния случай, **за отчитането на регионалния фон, при решаването на двумерната и тримерната задача е използван линеен полином от първа степен**. В двумерното пространство той се описва с два коефициента, а в тримерното – с три.

12.5.2. Определяне параметрите на модела в първо приближение

Необходимостта от смислено начално приближение е свързана с изискването стойността на оптимизационния функционал за това приближение да бъде в пределите на неговия глобален минимум. Ако оптимизацията се стартира със стойност на функционала далеч от глобалния му минимум, преодоляването на локалните минимуми е затруднено и крайният резултат от оптимизацията може да не бъде положителен. Това налага методически да бъдат използвани различни аналитични, графични и др. преки методи за съставяне на възможно най-близко до реалните смутители първо приближение. В случая за конкретната задача са използвани методът на характерните точки в рамките на възприетия модел, методът на подобие то в рамките на извършените преобразувания на конкретния модел, както и пряк метод на базата на разликата между наблюдаваното и аналитично продълженото на различни нива поле.

По същия начин стои въпросът за избор на начално приближение на физическия параметър. Изборът на начална стойност на плътността обобщава средната стойност на моделираните обекти. За целта са използвани параметричните определения на ρ от сондажни ядки. За различните тела от модела, аномалообразуващата плътност $\rho_{\text{еф}}$ е различна, поради забелязаната тенденция за увеличаване на пясъкливата съставка в солта към периферията на основното Мировско солно тяло. Това води до намаляване на плътностния контраст и

търсене на вариантни решения с различни плътности. В крайна сметка за различните тела изграждащи модела са избрани плътностите осигуряващи минимално средноквадратично отклонение между моделната и реално измерената Буге аномалия. Този подход се базира на теоретично обоснованата в *Глава I* зависимост за тела с ръбести точки (Страхов, 1972). Конкретно за плътността на третото тяло (Тяло 3), поради наличието в тази част от планшета на релефни форми, водещи до влияния в аномалията Буге, които могат да бъдат отстранени само с въвеждането на корекция за релеф, прави интерпретацията за това тяло от модела в сравнение с останалите две тела по-малко надеждна.

В първо приближение е създаден начален физико-геоложки модел съставен от три сферични тела. С цел определяне и задаване на параметрите на модела, е решена обратната гравиметрична задача като са използвани аналитични и графични методи. Началните стойности на моделните параметри са формирани въз основа на приблизителни решения за интегралните характеристики на телата и положението на някои особени точки: център на тежестта, аномална маса, аномалната плътностна разлика на телата и др.

12.5.3. Решаване на правата задача за първото приближение на модела

Правата гравиметрична задача е решена съгласно предложената методика, основаваща се на разработената и описана в *Глава II* програмна система СИМИНГРАН, която предлага разнообразни моделни възможности. За конкретния случай са избрани три гравиметрични модела, с които е апроксимирана геоложката среда в три варианта.

Като най-прост елемент за първия вариант (Вариант I) е използван модела на сфера с хомогенна плътност. Използвани са три сфери, с които е направена усреднена апроксимация на изучаваната геоложка среда в пределите на разглеждания планшет.

На следващия втори етап (Вариант II) моделът е сложен като сферите са заменени с даващите възможност за по добра апроксимация на геоложката среда елипсоидни тела.

Реализиран е и трети вариант на средата с помощта на вертикални многостенни призми, с които да се увеличи сложността на модела.

Смятаме, че за моделирането на конкретната физико-геоложка среда, при изградените вече представи за модела е достатъчно. По-важно е в следващия етап – оптимизацията на модела, да бъде използвана повече допълнителна информация, с която да се преодолее теоретично заложената в задачата многозначност на решението.

12.5.4. Оптимизация на модела

След формиране на началното състояние на модела се осъществява неговата оптимизация, т.е. търсят се стойностите на моделните параметри, за които разликата между полето на модела и зададеното поле е най-малка. Уравнението на решаваната обратна задача има общия вид описан подробно в *Глава I*.

Минимизацията на функционала за преобладаващата част от моделите е извършена с прилагане на метода на Левенберг-Марквард. В конкретния случай този метод е използван в комбинация с Метода на доверителната област. Това се налага, тъй като при многопараметрични оптимизации методът ДО дава по-стабилни решения в рамките на зададените параметрични ограничения. Освен това при метода ДО се преодолява частично необходимостта от това, стойността на оптимизационния функционал при първото приближение да бъде в пределите на неговия глобален минимум.

В конкретния случай са приложени следните ускоряващи и стабилизиращи оптимизацията фактори:

- Използвани са авторегуляризиращите свойства на метода Левенберг-Марквард;

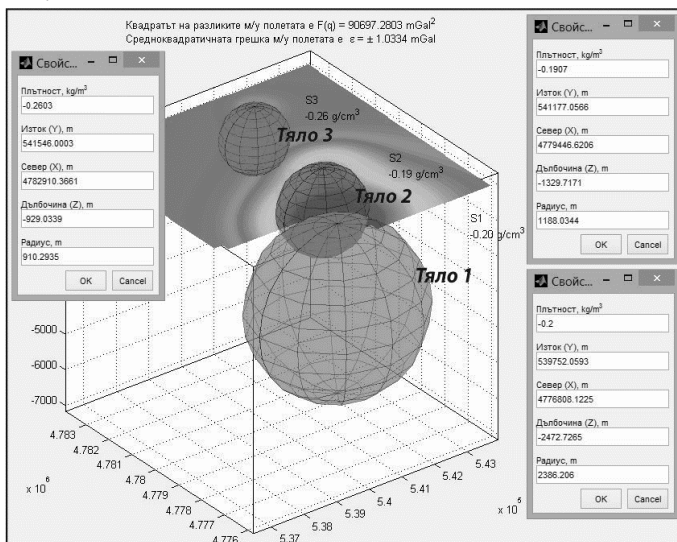
- Използвана е способността на метода на доверителната област да търси и открива глобалния минимум на функционала $F(q)$;
- Наложени са ограничения на параметрите „отгоре“ и „отдолу“;
- Наложени са взаимни ограничения на параметрите на модела;
- Оптимизацията е осъществена в смесен режим. Автоматизирано и интерактивното участие на интерпретатора в оптимизационния процес.

12.5.5. Графично и таблично представяне на резултатите

Графичното представяне на резултатите е извършено чрез използване на подходящи триизмерни изгледи на оптимизираните в СИМИНГРАН модели, както и чрез визуализиране на резултатите за оптимизираното и разликовото поле с помощта на популярната програма за обработка и визуализация на мрежови Surfer. Тази част от решението на задачата е от съществено значение, тъй като благодарение на нея се получава цялостна визуална представа за пространственото разпределение на отличаващите се по плътност маси, изграждащи геоложката среда в пространството под изучавания район.

Вариант 1

Регионалното поле във *Вариант 1* е зададено чрез пространствен полином от първа степен, съдържащ три коефициента. Техните стойности са изчислени чрез серия последователни минимизации на оптимизирания функционал съвместно с определените при първо приближение смущаващи тела от вида на сферичните, т.е. чрез последователна и съвместна оптимизация на коефициентите на регионалния фон и параметрите на аномалообразуващите тела.



Фигура 3.5. Оптимизирано решение на обратната гравиметрична задача за Вариант 1 съставен от три сферични тела с хомогенна ефективна плътност.

Във *Вариант 1* аномалообразуващите тела са представени от сферични тела с различни пространствени, геометрични и физични свойства. Моделът е съставен чрез последователно добавяне на сферите и тяхната индивидуална и съвместна оптимизация. В първо приближение всички сфери са задавани с начална ефективна плътност $\rho_{\text{эф}} = -0,2 \text{ g/cm}^3$ като първа е оптимизирана сферата съответстваща на Тяло 1. По този начин е „обран“ основният ефект от най-изразителната аномалия в рамките на изследваната площ. В рамките на резултатното поле е локализирана област, намираща се североизточно от първата сфера, в която разликите в измереното и моделното поле са максимални. Именно там е добавена втората сфера в модела, след което отново е извършена серия оптимизации на неговите параметри. Третата сфера е прибавена в модела като е използван същият подход. Накрая на оптимизационния процес е извършено минимизиране на разликовото поле чрез оптимизиране на коефициентите на регионалния фон, вследствие на което е получен резултатът представен на фиг. 3.5. В допълнение е решена и обратната гравиметрична задача по отношение на ефективната плътност на телата като по този начин са получени известни корекции в началното приближение на този параметър.

Стойността на квадрата на минимизираните разлики между двете полета (оптимизираният функционал) е $F(q) = 90697,28 \text{ mGal}^2$, а средноквадратичната грешка съответно $\varepsilon = \pm 1,03 \text{ mGal}$. Прекратяването на автоматизирания процес е свързано с достигане на зададеното минимално изменение в стойностите на разликите в резултатната функция ($\text{ToIFun} = 1\text{E-}06$) за две последователни итерации ($\text{exitflag} = 3$ съгласно *Глава II, табл. 2.3*).

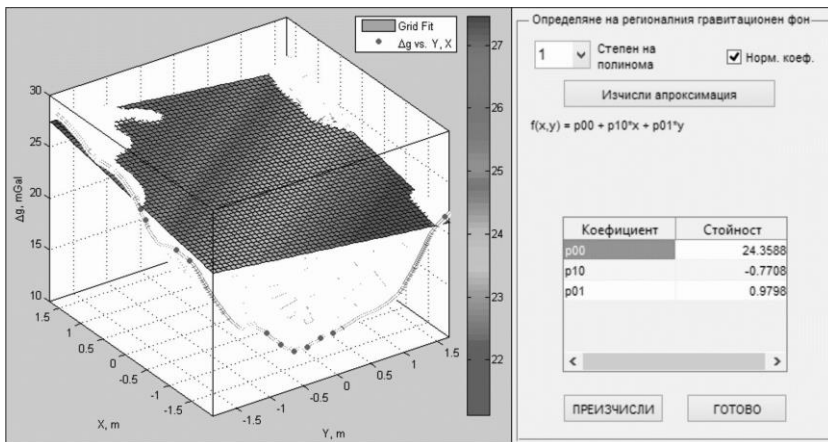
Вариант 2

Подробно описание на модела е представено в дисертационния труд!

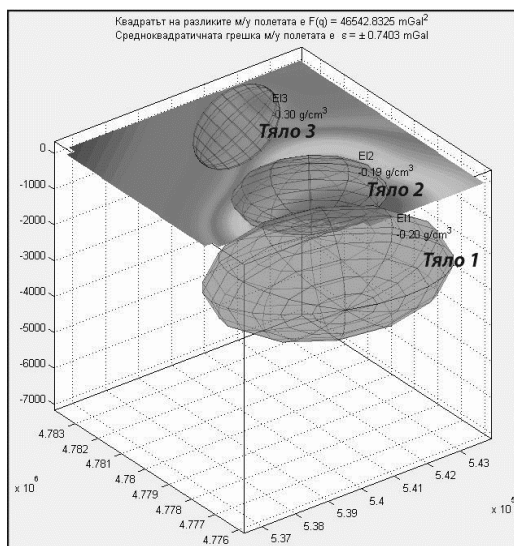
Вариант 3

Получените в първия вариант параметри на сферични маси са използвани за съставянето на *Вариант 3*. Тук моделът е създаден с помощта на елипсоиди, заместващи оптимизираните при *Вариант 1* сфери. Полученото по този начин първо приближение съвпада изцяло с оптимизираното решение на първия вариант. При последвалите минимизации на функционала, обаче са освободени за оптимизация и трите радиуса на елипсоидите както и трите ъгъла, определящи положението им в пространството. Тази гъвкавост на елипсоидите ги прави много подходящи за „обиране“ на неоптимизираните участъци от моделното пространство. Принципът, по който е извършена оптимизацията е подобен на описания във *Вариант 1* като тук последователно са заменени сферите с елипсоиди, след което те са „дооптимизирани“. Накрая е извършена съвместна оптимизация на всички геометрични параметри на модела, както и оптимизация на коефициентите на регионалния фон (фиг. 3.6). Оптимизационният процес е приключен с „дооптимизация“ и на ефективната плътност на фиксирания в пространството оптимизирани елипсоиди.

В конкретния случай стойността на минимизираната целева функция намалява, достигайки $F(q) = 46542,83 \text{ mGal}^2$, а средноквадратичната грешка е определена на $\varepsilon = \pm 0,74 \text{ mGal}$. Прекратяването на автоматизирания оптимизационен процес е свързано с това, че изменението в оптимизираните параметри за две последователни итерации е по-малко или равно на зададената допустима разлика ($\text{ToIX} = 1\text{E-}06$; $\text{exitflag} = 2$ съгласно *Глава II, табл. 2.3*).

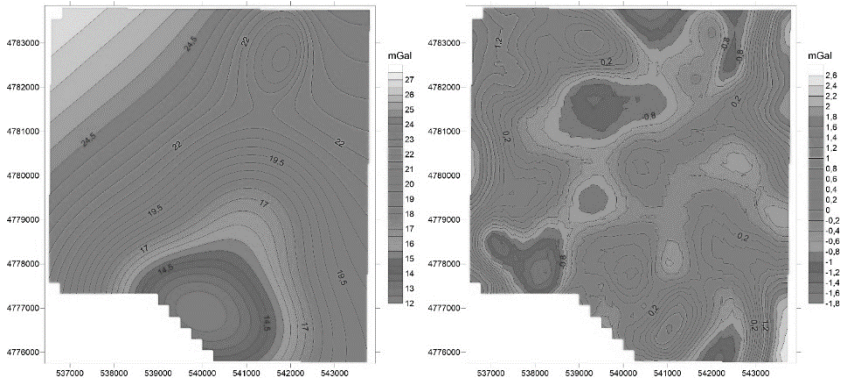


Фигура 3.6. Графично представяне на „дооптимизирания“ за Вариант 2 регионален фон в изследваната площ със стойности на определените коефициенти на апроксимиращия го полином от първа степен.



Фигура 3.7. Оптимизирано решение на обратната гравиметрична задача за Вариант 2 съставен от три елипсоидни тела с хомогенна ефективна плътност.

Резултатите от решението на обратната гравиметрична задача за Вариант 3 са представени графично на фиг. 3.6, фиг. 3.7 и фиг. 3.8, а стойностите на оптимизираните параметри за трите елипсоида са систематизирани в табл. 3.2.



Фигура 3.8. Моделно гравитационно поле за Вариант 3 (ляво) със съответното разликово поле (дясно).

Таблица 3.2. Стойности на оптимизираните физични и геометрични параметри на трите елипсоида съгласно решението на обратната гравиметрична задача за Вариант 3.

| Тяло № | $\rho_{\text{эф}}$ [g/cm ³] | Y [m] | X [m] | Z [m] | a [m] | b [m] | c [m] | α [deg] | δ [deg] | γ [deg] |
|--------|---|--------|---------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | -0,200 | 539821 | 4776960 | -1650 | 3183 | 1924 | 1563 | 292,2 | 0,0 | 90,0 |
| 2 | -0,191 | 541091 | 4779519 | -980 | 1942 | 1615 | 683 | 303,9 | 0,7 | 270,0 |
| 3 | -0,300 | 541323 | 4782980 | -624 | 1354 | 1219 | 369 | 189,5 | 0,0 | 126,2 |

12.5.6. Оценка и геоложко осмисляне на резултатите от интерпретацията

Цялостната **оценка за качеството** на трите вариантни решения се базира не само на получените статистически характеристики за близост на моделната и реалната геоложка среда, но и въз основа на геоложките представи за строежа на средата в района.

С помощта на използваните три сферични тела във *Вариант 1* добре се описва положението на центъра на масите, създаващи аномалното гравитационно поле. Резултатът може да се приеме за едно добро начално приближение, което да даде насока за създаването на по-сложни и реалистични във физико-геоложки смисъл интерпретационни модели.

Интерпретационният профил от *Вариант 2* дава добър резултат, но той отново има насочващ характер, тъй като са минимизирани разликите между аномалното и моделното поле непосредствено над профила. Останалата част от аномалното поле не е апроксимирана достатъчно добре с моделната аномалия. Въпреки това, в най-общи линии, разположението на елипсоидите е близко до това на сферите от *Вариант 1*.

При *Вариант 3* освен центровете на масите, благодарение на по-голямата гъвкавост на елипсоидните модели, които в този случай са интерпретирани свободно в целия обем на модела, се дава допълнителна представа за пространственото разпределение на аномалообразуващата геоложка среда. Този вариант може да се приеме за най-близко моделно приближение до реалната геоложка среда в изследваната площ.

В триизмерното пространство е видно, че елипсоидните тела апроксимират сравнително добре пространственото положение на отрицателните плътностни нееднородности в геоложката среда. За първото и второто тяло уверено може да се каже, че отразяват разпределението на солта в геоложката среда. За третото тяло, разположено северно от с. Манастир, най-вероятно аномалията в стойностите на силата на тежестта се дължи на релефните форми на терена, тъй като профилът, по който са извършени гравиметричните измервания съвпада с негативна релефна форма (дере), достигаща над 150 m.

Качествената интерпретация на полето е извършена на базата на анализа на резултатите от преобразуванията на аномалното гравитационно поле. Тя дава представа за интервалите на дълбочинното разположение на разуплътнените аномалообразуващи маси.

Анализът на построената гравиметрична карта на аномалиите Буге и извършената качествена и количествена интерпретация позволяват да се направят следните основни изводи:

- Аномалното гравитационно поле в пределите на изследваната площ се изменя в интервала 10 – 29 mGal.
- В югозападната част на картата на аномалиите Буге се оформя много ясно негативна гравитационна аномалия, която представлява североизточен фрагмент от Мировския гравитационен минимум, който се изтегля в северозизточна посока.
- Отрицателната локална гравитационна аномалия, която е изтеглена в североизточна посока и е непосредствено свързана с Мировската подсказва, че Мировското солно тяло продължава в същата посока. Това продължение се идентифицира с второто тяло от модела.
- В североизточната част на изследваната площ се оформя нова, значително по-малка от Мировската, отрицателна локална аномалия (Манастирска локална аномалия), която се разполага северно от с. Манастир. Тя най-вероятно се дължи на влиянието на релефа и не е свързана с разуплътняване на геоложката среда.
- Оптимизираният модел, който най-добре апроксимира геоложката среда в изследвания район е показан на фиг. 3.7 (*Вариант 3*). Графично е илюстрирано разположението на телата изграждащи модела, които най-добре апроксимират разпределението на плътностните нееднородности в пространството под земната повърхност. Физичните и геометричните параметри на окончателния модел са представени в табл. 3.2.

Заклучение

Задълбоченото запознаване със съвременното състояние и проблемите на количествената интерпретация на гравитационни данни показва, че във връзка с класическата некоректност на обратната задача и наличието на смущение във входните данни е много трудно да бъдат получени устойчиви решения на задачата. От съществуващите многобройни интерпретационни методи днес най-голямо разпространение и приложение са получили методът на подбора и методът на регуляризацията. Причината за това е възможността при реализацията на тези методи да бъде използвана допълнителна информация за решение на задачата и ако методът на подбора е ефективен при решението на сравнително по-прости задачи, то методът на регуляризацията има преимущества при решаването на сложни многопараметрични обратни задачи. Съвместното използване на двата метода при решаването на конкретни геоложки задачи е оптимално. Ефективността им нараства още повече, ако по време на интерпретацията специалистът геофизик може да се намесва в процеса и да променя посоката на оптимизацията.

Във връзка със значителното увеличение на параметрите описващи изучаваната среда, създаването на триизмерни модели е сложен и тежък процес, който с помощта на съвременната компютърна техника е значително облекчен. От друга страна, увеличаването броя на параметрите в комбинация с наличието на погрешност във входните данни води до значителна неустойчивост при решаването на обратната гравитационна задача. Преодоляването на тези затруднения може да бъде осъществено единствено чрез последователно съчетаване на метода на подбора и метода на регуляризацията като оптималният избор на параметри на регуляризацията обезпечава получаването на устойчивото приближение на решението на обратната задача. Основа за построяване на подходящ регуляризиращ оператор е разработената от А. Н. Тихонов теория на регуляризираните решения на обратните задачи (Тихонов & Арсенин, 1986).

В дисертацията са разработени алгоритми и програми за интерпретация на гравитационни аномалии в интерактивен режим, които дават възможност за реализиране метода на регуляризацията в рамките на даден модел, включващ няколко различни по форма и плътност тела. Тези алгоритми и програми са обединени в единна **СИСТЕМА ЗА МОДЕЛИРАНЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА ГРАВИТАЦИОННИ АНОМАЛИИ (СИМИНГРАН)**. За оптимизацията на моделите се използва допълнителна информация, която според теорията за некоректно поставените задачи, стабилизира решението на обратната гравитационна задача. Включването на тази информация в модела се извършва от интерпретатора непосредствено при неговото създаване и може да бъде допълвана непрекъснато по време на интерпретацията чрез директно въздействие посредством пълна свобода на редакция и ограничаване на параметрите на модела в рамките на зададената координатна система.

Разработената система **СИМИНГРАН** е използвана при обработката и интерпретацията на данните от гравиметричните проучвания в района на гр. Провадия. Тя се използва и при обучението на студентите геофизичи специалност „Приложна геофизика“ към Геологопроучвателния факултет на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“.

Системата е отворена и подлежи на по-нататъшна актуализация и представлява още едно съвременно средство за интерпретация на аномалното гравитационно поле.

Публикации свързани с дисертационния труд

- 1) Цанков, Хр., Папратилов, И. (2013). Програма за решаване на обратната гравиметрична задача чрез оптимизиране на модели съставени от краен брой триизмерни призматични тела. *Годишник на МГУ (под печат)*, 56.
- 2) Papratilov, I., Tzankov, Ch. (2012b). Comparing the accuracy and speed of calculation of two vertical rectangular prisms in MATLAB environment. *3rd International Geosciences Student Conference, 29-31 May 2012* (стр. 6). Belgrade: AGES.
- 2) Папратилов, И., Цанков, Хр. (2012а). Сравняване точността и скоростта на изчисляване на правата и обратна гравиметрична задача за две вертикални правоъгълни призми в MATLAB среда. *X-та Национална младежка научно-практическа сесия, 23 - 24 април 2012* (стр. 10). София: ФНТС.
- 3) Цанков, Хр. (2011). Сравняване скоростта на обработка на големи масиви от данни през централния процесор (CPU) и графичния процесор (GPU) при решаването на приложни геофизични задачи. *Годишник на МГУ*, 54.
- 4) Цанков, Хр., Радичев, Р. (2010а). Алгоритми и програми за интерпретация на двумерни гравитационни аномалии в МАТЛАБ среда. *Годишник на МГУ*, 53(1), 174-181.
- 5) Цанков, Хр., Радичев, Р. (2010b). Оптимизация на двумерни гравитационни модели в МАТЛАБ среда. *6-та Национална конференция по геофизика, 17-ти декември 2010 г.* София: ДГБ. doi:ISSN-1314-2518.

Приноси

Дисертационният труд съдържа нови знания, а също разширява, задълбочава и детайлизира знанията по някои важни проблеми свързани с моделирането и интерпретацията на гравитационни аномалии в гравипроучването. Получените резултати могат да бъдат систематизирани в следните научно-методични и научно-приложни приноси:

- Разработени са алгоритми за моделиране в интерактивен режим на разнообразни по форма (от прости до сложни) геоложки тела, създаващи гравитационни аномалии. Аналитичните изрази за формата и пространственото положение на някои от използваните физико-математически модели са доразвити, което повишава техните качества и гъвкавост в процеса на моделирането. Такива модели са хоризонталния кръгов цилиндър в триизмерното пространство и хоризонталния елиптичен цилиндър в двумерното пространство.
- Създадени са алгоритми и програми за графично представяне и моделиране на геометрични тела както и такива за визуализация на измерените, моделните и разликовите аномалии.
- Създадена е процедура (алгоритъм) за интерактивно въздействие от страна на интерпретатора върху оптимизирания гравиметричен модел.
- Алгоритмите за оптимизация на моделите са разработени като регуляриращи оператори съгласно теорията на А. Н. Тихонов, което позволява въвеждането на разнородна допълнителна информация, стабилизираща решението на обратната гравиметрична задача.
- Разработените алгоритми и програми са обединени в единна автоматизирана Система за Моделиране и Интерпретация на Гравитационни Аномалии в интерактивен режим (*СИМИНГРАН*).
- Извършено е теоретично и моделно изследване на свойствата на използваните алгоритми за решаване на правата и обратна гравиметрична задача.
- Автоматизираната система *СИМИНГРАН* е приложена за интерпретация на гравитационни аномалии с използване на цялата налична допълнителна информация при изучаване на солни тела на територията на Провадийската депресия по геофизични данни.

Литература

- Barbosa, V. C., Silva, J. B., & Medeiros, W. E. (1997). Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths. *Geophysics*, 62, 1745–1757.
- Cady, J. W. (1980). Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygonal prisms. *Geophysics*, 45, 1507–1512.
- Chai, Y., & Hinze, W. J. (1988). Gravity inversion of an interface above which the density contrast varies exponentially with depth. *Geophysics*, 53, 837–845.
- Clark, D. A., Saul, S. J., & Emerson, D. W. (1986). Magnetic and gravity anomalies of a triaxial ellipsoid. *Exploration Geophysics*, 17, 189–200.
- Cordell, L., & Henderson, R. G. (1968). Iterative three-dimensional solution of gravity anomaly data using a digital computer. *Geophysics*, 33, 596-601., 33, 596-601.
- Emerson, D. W., Clark, D. A., & Saul, S. J. (1985). Magnetic exploration models incorporating remanence, demagnetization and anisotropy : HP 41C handheld computer algorithms. *Exploration Geophysics*, 1-122.
- Guspi, F. (1992). Three-dimensional Fourier gravity inversion with arbitrary density contrast. *Geophysics*, 57, 131–135.
- Hjelt, S. E. (1972b). The gravity anomaly of dipping a prism. *Geoexploration*, 12, 29-39.
- Kim, H. J. (1987). Computations of Gravitational Anomalies for Axi-Symmetric Bodies. *The Journal of the Geological Society of Korea*, 23(1), 90-93.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63, 109–119.
- More, J., & Sorensen, D. (1983). Computing a trust region step. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 4(3), 553-572.
- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., . . . Ruder, M. E. (2005). 75th Anniversary: Historical development of the gravity method in exploration. *Geophysics*, 70, 63-89.
- Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31, 362–371.
- Pedersen, L. B. (1977). Interpretation of potential field data — A generalized inverse approach. *Geophysical Prospecting*, 25, 199–230.
- Reamer, S. K., & Ferguson, J. F. (1989). Regularized two-dimensional Fourier gravity inversion method with application to the Silent Canyon caldera, Nevada. *Geophysics*, 54, 486–496.
- Roberto, A., Moraes, V., & Hansen, R. O. (2001). Constrained inversion of gravity fields for complex 3-D structures. *Geophysics*, 66(2), 501-510.
- Talwani, M., & Ewing, M. (1960). Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, 25, 203–225.
- Блох, Ю. И. (1998). *Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий*. Москва: Московская Государственная Геологоразведочная Академия.
- Булах, Е. Г., Маркова, М. Н., Тимошенко, В. И., & Бойко, П. Д. (1984). *Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий (Метод минимизации)*. Киев: Наукова думка.
- Булах, Е. Г., Ржаницын, В. А., & Маркова, М. Н. (1976). *Применение метода минимизации для решения задач структурной геологии по данным гравиразведки*. Киев: Наукова думка.
- Гласко, В. Б. (1984). *Обратные задачи математической физики*. Москва: Издательство Московского университета.
- Голиздра, Г. Я. (1977). *Основные методы решения прямой задачи гравиразведки на ЭВМ*. Москва: ШЭМС.
- Гольдшмидт, В. И. (1984). *Оптимизация процесса количественной интерпретации данных гравиразведки*. Москва: Недра.
- Гольцман, Ф. М. (1971). *Статистические модели интерпретации*. Москва: Наука.
- Делинджер, П. (1982). *Морская гравиметрия*. (С. С. Иванова, Прев.) Москва: Недра.
- Димитров, Л. (1976). *Гравипроучване*. София: Техника.

- Добрев, Т., Иванова, В., & Радков, Р. (1989). *Комплексиране при геофизините проучвания*. София: Техника.
- Добрев, Т., Ставрев, П., & Радичев, Р. (1988). Методика на интерпретация на дребномащабни гравитационни и магнитни аномалии от криптомагмени тела. *Годишник на ВМГИ*, 34(3), 13-29.
- Кравцов, Г. Г., & Сегалович, В. И. (1976). Итерационные алгоритмы подбора геологических моделей по гравитационным наблюдениям и их практическое приложение. От *Вопросы рудной геофизики в Казахстане* (стр. 17-35). Ленинград.
- Миланова, В., & Чешитев, Г. (1992). *Обяснителна записка към геоложка карта на България в М 1:100000, Картен лист Провадия*. (Г. Чешитев, Ред.) София: Издателство на БАН.
- Монахов, И. Б. (1998). *Доклад за преизчисляване на запасите от каменна сол и натриев хлорид в Мировското каменосолно находище в гр. Провадия, Варненска област*. София: Геофонд на МОСВ.
- Мудрецов, Е. А. (1981). *Гравиразведка: Справочник геофизика*. Москва: Недра.
- Пашко, В. Ф., & Старостенко, В. И. (1982). *Методы решения прямых и обратных задач гравиметрии и магнитометрии на ЭВМ /По материалам зарубеж. публ./*. Москва: ВИЭМС.
- Радичев, Р. (1988). *Интерпретация гравитационных аномалий с использованием метода регуляризации (Кандидатская диссертация)*. Москва: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.
- Радичев, Р., & Димовски, С. (2001). Геофизична и геоложка интерпретация на Поповската магнитна аномалия. *Геология и минерални ресурси*, 8(10), 24-30.
- Ставрев, П. (1985). Комплект програми и подпрограми за моделиране на двумерни гравитационни и магнитни аномалии. *Годишник на ВМГИ*, 31, 31-40.
- Ставрев, П. (1996). *Методи на афинни преобразувания и моделиране при интерпретацията на магнитни и гравитационни аномалии (Докторска дисертация)*. София: МГУ, катедра ПГ.
- Ставрев, П. (2009). *Методи за решаване на некоректни задачи в геофизиката*. София: Изд. къща "Св. Ив. Рилски".
- Ставрев, П., & Радичев, Р. (1984). *Комплект програми и подпрограми за обработка и интерпретация на магнитни аномалии*. София: Инструкции към Лабораторията по магнитнопроучване при катедра "Приложна геофизика".
- Ставрев, П., & Радичев, Р. (1984b). *Методическо ръководство за упражнения по магнитни методи в геофизиката*. София: Печатна база към МНП.
- Ставрев, П., & Радичев, Р. (1989). Алгоритми и програми за интерпретация на магнитни и гравитационни аномалии с 2,5-мерни модели. *Годишник на ВМГИ*, 35, 27-37.
- Ставрев, П., & Радичев, Р. (1990). Система модели и програми за интерпретация магнитных и гравитационных аномалий. *36-ий Международный геофизический симпозиум, 2-5 X, 1990*, 3, стр. 569-577. Варна.
- Старостенко, В. И. (1978). *Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии*. Киев: Наукова думка.
- Старостенко, В. И., & Заворотько, А. Н. (1976). *Методика и комплекс программ решения обратной линейной задачи гравиметрии на ЭВМ "Минск-22"*. Киев: Наукова думка.
- Старостенко, В. И., & Оганесян, С. М. (1977). Устойчивые операторные процессы и их применение в задачах геофизики. *Физика Земли*, 5, 61-74.
- Страхов, В. Н. (1972). К вопросу о единственности решения плоской задачи теории потенциала. *Физика Земли*, 2, 38-49.
- Страхов, В. Н. (1976). Об интегральных и функциональных уравнений и некоторых обратных задач теории логарифмического потенциала и их значение для интерпретации гравитационных и магнитных аномалии. *Физика Земли*, 3, 54-66.
- Страхов, В. Н., & Лапина, М. И. (1976). Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии. *Докл. АН СССР*, 227(2), 344-347.
- Страхов, В. Н., & Луцицкий, А. И. (1980). О решении прямых двумерных задач гравиметрии и магнитометрии. *Физика Земли*(8), 65-83.

- Страхов, В. Н., Лапина, М. И., & Кузнецова, О. А. (1978). О прямых задачах гравиметрии и магнитометрии. *Прикладная геофизика*, 75, 106-124.
- Тархов, А. Г., Зондаренко, В. М., & Никитин, А. А. (1982). *Комплексирование геофизических методов*. Москва: Недра.
- Тихонов, А. Н. (1963а). О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации. *Докл. АН СССР*, 53(3), 501-504.
- Тихонов, А. Н. (1963б). О регуляризации некорректно поставленных задач. *Докл. АН СССР*, 153(1), 49-52.
- Тихонов, А. Н., & Арсенин, В. Я. (1986). *Методы решения некорректных задач*. Москва: Наука.
- Тончев, Й. (2007). *MATLAB 6,7: Преобразования, изчисления, визуализация. Часть I*. София: Техника.
- Тончев, Й. (2008). *MATLAB 6,7: Преобразования, изчисления, визуализация. Часть II*. София: Техника.
- Тончев, Й. (2009). *MATLAB: Преобразования, изчисления, визуализация. Часть III*. София: Техника.
- Трошков, Г. А., & Грознова, А. А. (1983). *Математические методы интерпретации магнитных аномалий*. Москва: Недра.
- Цанков, Х., & Папратилов, И. (2013). Програма за решаване на обратната гравиметрична задача чрез оптимизиране на модели съставени от краен брой триизмерни призматични тела. *Годишник на МГУ (под дпечат)*, 56.
- Цанков, Х., & Радичев, Р. (2010а). Алгоритми и програми за интерпретация на двумерни гравитационни аномалии в МАТЛАБ среда. *Годишник на МГУ*, 53(1), 174-181.
- Цанков, Х., & Радичев, Р. (2010б). Оптимизация на двумерни гравитационни модели в МАТЛАБ среда. *6-та Национална конференция по геофизика, 17-ти декември 2010 г.* София: ДГБ. doi:ISSN-1314-2518
- Чешитев, Г., Миланова, В., Попов, Н., & Коюнджиева, Е. (1994). *Обяснителна записка към геоложка карта на България в М 1:100000, Картни листове Варна и Златни пясъци*. (Г. Чешитев, Ред.) София: "Геология и геофизика" АД.
- Шалаев, С. В. (1972). *Геологическое истолкование геофизических аномалий с помощью линейного программирования*. Ленинград: Недра.
- Яновская, Т. Б., & Прохорова, Л. Н. (2004). *Обратные задачи геофизики*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета.