



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

“СВ. ИВАН РИЛСКИ”

ГЕОЛОГОПРОУЧВАТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА: Приложна геофизика

Димитър Георгиев Съчков

**„Методи за тримерно геометрично моделиране на
геоложки тела с помощта на CAD и GIS софтуер”**

АВТОРЕФЕРАТ

към дисертационен труд за придобиване на образователна
и научна степен „доктор“

Професионално направление 4.4 – „Науки за земята“

Научна специалност „Методи и техника на геоложките
изследвания“

Ръководител: доц. д-р Иван Димитров Иванов

София, 2016 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширено заседание на катедра „Геология и геоинформатика“ при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – гр. София, от 29,03,2016г.

Пълният обем на дисертацията е 186 страници, от които 14 страници приложения. В основният текст са включени 98 фигури (97 авторски и 1 цитирана), 5 таблици и 62 формули от които 39 авторски (в това число не се включват извадените в приложенията).

Използваната литература се състои от 48 труда, от които 20 са на български, 5 на руски и 23 на английски език. Цитираните фондови материали са 3.

Публичната защита ще се проведе на 30,05,2016 г. в Геологопроучвателният факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“ – София с научно жури в състав:

1. Проф. дгн Димитър Славчев Синьовски, МГУ катедра ГГИ
2. Доц. д-р Иван Димитров Иванов, МГУ катедра ГГИ
3. Член-кор. проф. дгн Христо Николов Дабовски, Геологически институт „Страшимир Димитров“ при БАН;
4. Проф. д-р Радослав Александров Наков, Геологически институт „Страшимир Димитров“ при БАН;
5. Доц. д-р Диян Ангелов Вангелов, Софийски Университет „Св. Климент Охридски“

Автор на дисертационния труд: маг. геол. Димитър Съчков

Заглавие: „Методи за тримерно геометрично моделиране на геоложки тела с помощта на CAD и GIS софтуер“

Ръководител на докторанта: доц. д-р Иван Димитров Иванов

Публикации по темата на дисертацията: четири

Материалите за предстоящата защита са на разположение на заинтересуваните лица в сектор „Следдипломна квалификация“.

Съдържание

1. Увод.....	1
2. Цели и задачи	3
3. Структура и съдържание на дисертационния труд.....	4
3.1. Част първа – състояние на проблема.....	4
3.2. Част втора – Анализ на компютърните методи за изчисляване на обем на сложни геоложки тела	6
4. Специална част – проблеми при геометризацията на геоложки тела с помощта на GIS и CAD софтуер.....	15
4.1. Метод на ограничителните повърхнини	16
4.2. GIS и CAD геометризация на геоложки тела чрез метода на ограничителните повърхнини	17
4.2.1. Геометризация на тела при силно разчленен терен	18
4.2.2. Геометризация на геоложки тела, разместени по наклонена разломна плоскост с помощта на метода на посочните косинуси.....	20
4.2.3. Геометризация на гънки (синклинали и антиклинали).....	24
4.2.4. Геометризация чрез интерполация на лещовидни тела с променлива дебелина	31
4.2.5. Геометризация на тела със сложна форма и нуждата от комбиниране на геометрична и статистическа обработка	39
4.3. Нови програмни приложения за интегриране на геоложка информация в компютърните модели	46
4.4. Примерни решения на конкретни геоложки задачи ..	47
5. Резултати	49
6. Основни приноси	53
7. Заключение	54
8. Публикации по темата на дисертационния труд.....	55
9. Използвана в автореферата литература	56

1. УВОД

Предложеният на вниманието на читателя труд е интердисциплинарен. В него се преплитат понятия от класическите геоложки дисциплини – стратиграфия, структурна геология, палеонтология, но също и минно-технически и икономически понятия, свързани с практиката на приложните геоложки проучвания, а също и елементи от съвременната геостатистика и методологията на географския информационен анализ. Преплитането на понятия не може да се избегне, тъй като именно такъв е контекстът на съвременното използване на GIS и CAD софтуер в приложните геоложки проучвания. Основната част от предоставения материал има отношения към геоложките проучвания на полезни изкопаеми, но по един или друг начин този материал е приложим и в практиката на инженерно-геоложките проучвания и при редица задачи на геоекологията, опазването на геоложкото наследство и др. свързани с геологията съвременни области на познанието. У нас все още няма стандартизирана школа на GIS и CAD геоложки анализ, подкрепена с достатъчно голям брой публикации, а като цяло такава няма и за света, затова и структурата и езикът на тази работа неизбежно отразяват слабостите не само на автора, но и на избраното научно направление.

Към настоящия момент за моделиране на геоложки тела и изчисляване на запаси от полезни изкопаеми се използват класически „ръчни“ и компютърни методи. Най-често използваните у нас „ръчни“ методи са „методът на геоложките блокове“ и „методът на вертикалните разрези“ (Христов, 1974), но в литературата са описани и конкретни ситуации, в които се прилагат и „метод на многоъгълниците“, „метод на триъгълниците“, „линеен метод“, „метод на изолиниите“, „метод на изохипсите“ и др. (Ушаков, 1962). При компютърното моделиране най-често се използват автоматизирани обработки на данните, базирани на методите „тежести, обратнопропорционални на разстоянието“ (Inverse distance weighted interpolation), детайлно описан от Watson & Philip (1985) и „Кригинг“ (Kriging) – на името на D. Krige (Бакърджиев и Въндев, 2006).

Макар и различни на пръв поглед, всички тези методи имат редица общи характеристики, една от които е и техният основен недостатък. Тези методи са чисто математически и не вземат предвид предвидимата структурна симетрия на масива, която може да се установи със

средствата на стратиграфията, структурната геология и др. геоложки подходи. Софтуерът автоматично „преминава“ през геоложките граници, тъй като все още не съществуват кодове, които да отчитат сложността на геоложката среда. По този начин е възможно да се изкриви или напълно да се заличи геоложкият строеж на обекта, който иначе подлежи на изследване със средствата на стратиграфията и структурната геология. Често пъти информацията за разпространението на продуктивната зона от полезно изкопаемо се губи поради неправилно интерпретиране на ограничаващ я разлом или гънка, което води до грешки в изчисляването на геоложките запаси.

В контекста на гореказаното целта на този труд е създаването на методология за рационалното включване на пространствена геоложка информация от терена при софтуерното моделиране на геоложки тела, което би имало голямо значение за повишаване на достоверността на софтуерно моделираните геоложки тела.

В работата не се отричат възможностите на статистическите похвати при визуализирането на пространствената изменчивост когато геоложките граници са добре дефинирани и точно поставени. Изказвам убеждението, че в практиката е наложително моделирането на геоложките граници да се изследва геометрично преди да се пристъпи към прилагане на статистическа обработка. Именно тук е същественият принос на работата, тъй като в нея се предлагат структурно-стратиграфски подходи на триизмерно моделиране специално разработени за интегриране на геоложката информация в GIS и CAD среда.

Представената методика цели да обезпечи по-често срещаните в практиката проучвания на индустриалните минерали и скали, както и редица инженерно геоложки изследвания. Подходът е базиран върху оценката на реалната геометрия на телата чрез интегриране и обработване на разнотипни данни, получени от геоложкото картиране и проучвателните изработки в GIS или CAD среда.

Работата по изграждането на приложената в дисертацията методика започва преди началото на докторантурата ми. Приложеният в нея подход е разработен за период от 5 години в хода на практически задачи, свързани с конкретни инвестиционни проекти, в които съм участвал лично като геолог-геоинформатик. В повечето от тези задачи съм участвал съвместно с научния си ръководител. Допълнителна

мотивация получих от работата си в катедра „Геология и геоинформатика“ към ГПФ на МГУ, където се разработва нова, модерна учебна програма за обучение на студенти, базирана на широко използване на GIS и CAD софтуер при моделирането на различни геоложки ситуации. В хода на работата си по написването на този труд получих помощ от научния си ръководител и от ръководителите на катедри „Геология и геоинформатика“ и „Приложна геофизика“ към ГПФ на МГУ проф. дгн Димитър Синьовски и проф. дгн Стефан Димовски, както и от фирмите „Геоминмарк“ ЕООД, „Геокадмин“ ЕООД, „Огняново – К“ АД и „Сакарела Мрамор и Гранит“ – ООД, за което изказвам моята благодарност.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Дисертационният труд е разработен в научното направление „Науки за земята“, специалност „Методи и техника на геоложките изследвания“ и не следва да се разглежда в чисто научен аспект, а като връзка между наука и практика.

Повечето съвременни компютърни методи не интегрират в достатъчна степен данните от геоложкото картиране и сами по себе си, не представят обективно реална геоложка геометрия, а залагат на натрупването на голямо количество еднотипна информация и статистическата и обработка. Това води до редица проблеми при моделирането на примерни геоложки тела.

Целта на този труд е разработването на детайлна методика, която да решава конкретни геоложки проблеми чрез интегриране на разнотипна геоложка информация и успешното анализиране и моделиране в GIS и CAD среда. Методиката е предназначена за използване при решаване на реални геоложки ситуации и да е приложима както самостоятелно, така и в комбинация с познатите до момента методи.

За постигането на основната цел са поставени следните задачи:

- Анализ на принципните проблеми, срещани при моделирането на геоложки тела и изчисляването на техните обеми;
- Анализ на методите за моделиране на геоложки тела и изчисляване на обеми и приложимостта им в различни геоложки обстановки;

- Анализ на основните „класически“ методи за изчисляване на геоложки запаси;
- Анализ на основните „модерни“ методи за компютърно генериране на обемни тела;
- Разработване на алгоритми за решаване на геоложки задачи, за които съществуващите до момента методи са недостатъчно ефективни по отношение на интерпретацията и моделирането на геоложката обстановка. Тези алгоритми ще послужат за изготвяне на методика, в която да може да се анализира разнородна по произход и количество геоложка информация, като се отделя по-голямо внимание на субективната геоложка преценка, отколкото на чисто математическата обработка на събрана база данни;
- Разработване на компютърно (софтуерно) приложение, за обогатяване възможността на GIS и CAD програмните продукти да манипулират геоложка информация;
- Демонстриране на приложимостта и надеждността на разработената методика за справяне с различни геоложки проблеми, чрез представяне на решения за конкретни геоложки обекти.

3. СТРУКТУРА И СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

След като са поставени целите на този труд, задачите които биха довели до успешното му написване и защита, са разделени на три основни части: Състояние на проблема, анализ на компютърните похвати за моделиране и специална част, даваща решенията на поставените в първите две части проблеми. Поради значимостта на третата част (специалната), тя е разгледана отделно от първите две.

3.1. Част първа – състояние на проблема

Първата част обхваща анализирането на често срещани геоложки проблеми и актуалните към момента методи за тримерно геолошко моделиране и пресмятане на обемите на обемите на сложни геоложки тела. Поради широкия обхват на геоложката работа и проблемите от твърде различни естества тук са разгледани само най-главните от тях:

- Силно разчленения релеф;
- Скритите (покритите от съвременни наслаги) ерозионни форми;

- Изветрителните процеси действащи в момента в масивни скали;
- Правилното отчитане на тънкопластови скали;
- Интерпретация на изкливащи пластове и лещовидни тела;
- Отчитане на обедняването на полезното изкопаемо в зони на крехка деформация и карстови зони;
- Правилната интерпретация на отместванията по разломни нарушения;
- Коректно моделиране на гънкови структури.

Тези най-често срещани в етапите на геоложките проучвания проблеми са използвани като отправна точка за разглеждането на възможностите на актуалните към момента методи за моделиране и изчисляване. На първо място са разгледани „класическите“ (без използване на компютър) методи (Ушаков, 1962 и Христов, 1974). Под внимание са взети общо седем метода:

- Метод на геоложките блокове;
- Метод на вертикалните разрези;
- Метод на многогълниците;
- Метод на тригълниците;
- Линеен метод;
- Метод на изолиниите;
- Метод на изохипсите.

За всеки от посочените методи са разгледани неговата математическа основа, за решаването на какви геоложки ситуации и типове полезни изкопаеми е създаден, както и неговата възможност за справяне с разгледаните по-горе геоложки проблеми.

Резултатът от анализа на тези методи показва, че независимо кой от тях е избран за изчисляване на запаси от полезно изкопаемо, могат да се отчетат следните недостатъци:

- Никой от методите не предполага възможността за описване на тяло със стръмни граници;
- Нито един от методите не е създаден така, че да отчита формата на покриващите наслаги;
- Нито един от методите не е създаден така, че графично да представя общия обем на геоложкото тяло;
- Няма разгледан метод който да е създаден, така че да работи добре при нагънат залеж;

- Разгледаните методи не предполагат възможността за отчитане на структурните изменения (деформациите) в изследвания масив.

Предвид техническите възможности по времето на създаване на повечето от тези методи, а именно началото и средата на XX в., не може да се очаква, че тяхното прилагане би могло да отчита геоложки ситуации като описаните по-горе и изискващи обработването на голямо количество информация. Към настоящият момент, както във всяка една дейност, и в геоложките проучвания се използват компютри за моделирането на обемни тела.

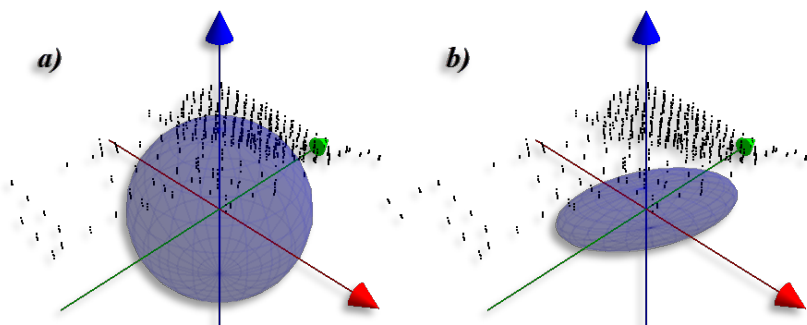
3.2. Част втора – Анализ на компютърните методи за изчисляване на обеми на сложни геоложки тела

Във втората основна част на дисертационния труд е направен анализ на компютърните похвани използвани в геоложката дейност. Разгледани са възможностите за създаване на блокови модели за изчисляване на геоложките запаси или обемни тела заключени между тримерни повърхнини.

В геоложката практика най-често се прилага изграждането на блокови модели, което става чрез статистическа обработка на получената от проучвателните изработки (сондажи, канали и т.н.) информация. Ето защо на този подход е обърнато специално внимание, чрез разглеждане на най-често прилаганите статически методи:

- Тежести обратнопропорционални на разстоянието;
- Кригинг метод.

Извадена тяхната математическа основа, разновидностите ми, сфери на приложение където дават добри, както и слабите им страни. Освен това са описани етапите от създаването на блоков модел, като са разгледани термините воксел (voxel), размер на единичната клетка, елипсоид на търсене (фиг. 1) и т.н.

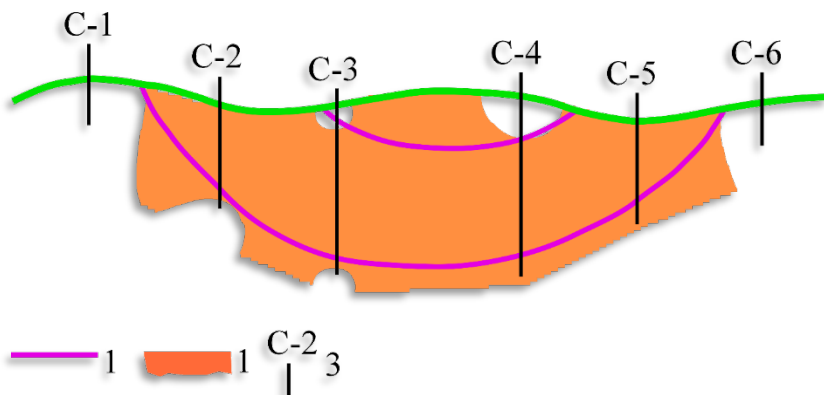


Фиг. 1. Параметри на търсенето при изграждане на блоков модел:
а) сфера при моделиране на обемно тяло в масивна среда. б) елипсоид на търсенето при моделиране на структурно контролиран масив

След направения анализ на посочените методи се стигна до извода, че каквито форми и размери да зададем, както на елипсоида на търсене, така и на единичния паралелепипед, базата данни е фундаментът на всяко моделиране. Независимо дали използваме „Тежести обратнопропорционални на разстоянията“, „Кригинг“ или друг метод за статистически анализ и обработка на информацията, има едно основно правило, което е и слабото място на този тип моделиране – базата данни трябва да съдържа голямо количество еднотипна информация. По този начин, до голяма степен се елиминира възможността за влияние от субективната оценка на геоложката ситуация. В крайна сметка геологът би следвало да може да управлява софтуера и да определи формата и размера на дадено тяло. В общия случай обаче, използвайки геоложки блокове, възможността за доработка на един модел е силно ограничена.

Като пример за „неуниверсалността“ на блоковия модел може да се посочи моделирането на пластово геолошко тяло разположено в килната част на синформна гънка. Независимо кой от разгледаните методи за статистическа обработка и моделиране използваме, при недостатъчно гъста сондажна мрежа резултатът не би бил коректен (фиг. 2). Поради голямата разлика в разстоянията между сондажите и интервалите на опробване в тях, част от разстоянията между сондажите се интерпретират неправилно. Със съгъстяване на сондажната мрежа,

ефектът от тази особеност на моделирането би се минимализирал, но разбира се ще оскъпи, често пъти неоправдано, проучването.



Фиг. 2. Разрез на полезно изкопаемо разположено в килната зона на синформна гънка.

1 – реална геометрия на полезното изкопаемо; 2 – форма (област) на моделираното геоложкото тяло според компютърна интерпретация по метода „тежести обратнопропорционални на разстоянието“; 3 – проучвателни сондажи

Този пример може би е най-добрият показател за нуждата от използването на повърхнини, които да са дефинирани по геоложки, а не по статистически критерии. По тази причина в дисертационния труд е отделено голямо внимание и вторият познат метод за компютърно моделиране – използването на повърхнини.

Компютърно генерираните повърхнини могат да бъдат два типа:

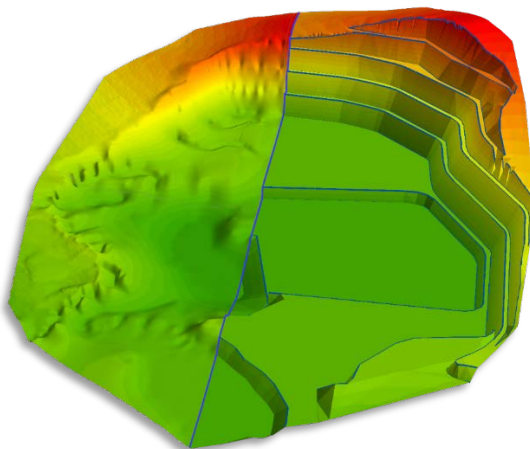
- Растерни (GRID) повърхнини;
- Векторни (TIN) повърхнини.

За GRID и TIN повърхнините е разгледан начин им на създаване, информацията която използват и сферите им на приложение. В общи линии може да се обобщи, че растерните повърхнини се създават по подобие на блоковите модели, най-често използвайки методите „Тежести обратнопропорционални на разстоянието“ и „Кригинг“, а

векторните използват за основа познатият от векове метод на триангулацията.

След направения анализ на по-надеждни за моделиране с ограничено като количество, но за сметка на това разнородна по тип информация беше определен векторния способ на генериране на повърхнините.

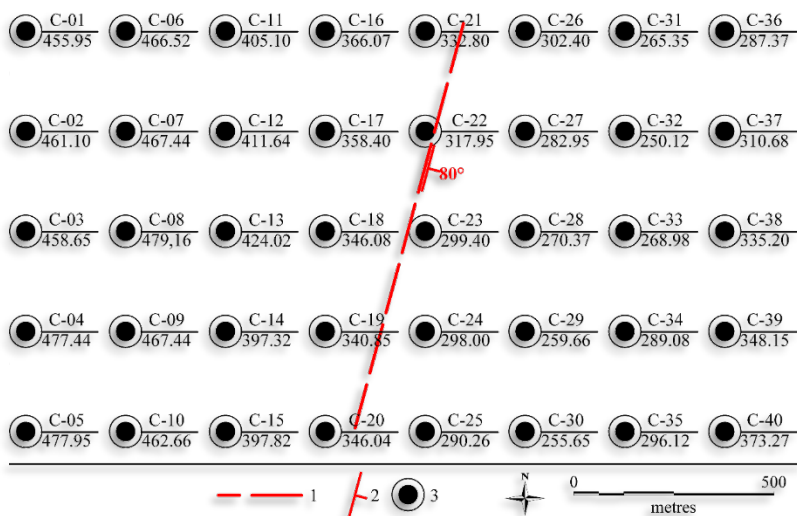
Защо TIN да е по-точен от GRID (DEM) моделите? Защото Triangular означава „триъгълна“, от теорията на математиката се знае, че триъгълникът е най-малката възможна плоскост, а не квадратът, използван при растерите. Irregular е „неправилна“ (Bratt, 2004, Heywood, 2002 and Longley, 2005), а именно такава е формата на земната повърхност и не би следвало да се представя, като квадрати с изкуствено (не по данни за терена) определена площ, независимо от гъстотата на наличната информация. И трето, но не на последно място, структурата на тази триъгълна неправилна мрежа се характеризира с възможност за включването на линии на пречупване (Goodchild and Kemp, 1990). Тези линии са важни при дефиниране на сложни терени (повърхнини) с резки промени в геометрията, например кариерни гнезда и руднични котловани (фиг 3).



Фиг. 3. GRID (в ляво) и TIN (в дясно) повърхнини представящи ситуацията в кариера в напреднал етап на добив. Фигурата представя предимството на векторните повърхнини, получено от използването на линии на пречупване (изобразени в син цвят).

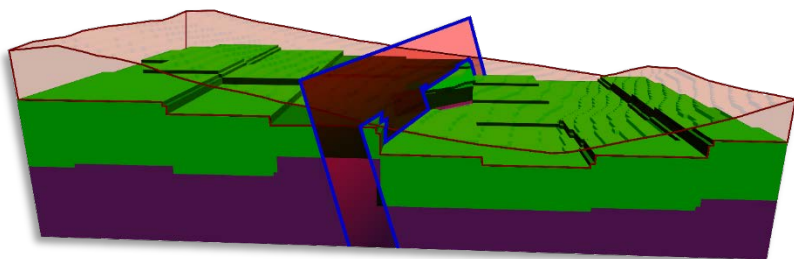
Проблемите при използването на статистическа, а не геометрична обработка на информацията при моделирането на резките промени в терена са очевидни, но в същото време проблемите при моделирането на разместванията по разломни нарушения остават незабелязани, въпреки тяхната значимост.

За демонстриране на тези проблеми са построени няколко различни обемни тела чрез данни за техните литоложки разновидности в общо 40 сондажа (фиг. 4). Изследва се стратифицирано полезно изкопаемо с дебелина приблизително 50 m, покрито от некондиционни скали. През тялото преминава разсед със страна и наклон 105/80°. Отместването по него е около 50-55 m.



Фиг. 4 Схема на разположението на сондажна мрежа и следата върху терена на разсед, минаващ през площта. 1 – линия на разлома, 2 – ориентация на разломната повърхнина, 3 – сондаж с номер и кота на устието.

На фигура 37 е показан блоков модел по сондажните данни, изготвен с разширението на MapInfo – Encom Discover. За изграждането му са използвани общо 160 точки, дефиниращи котата на терена, дълбочината на подсичане на горнището и долнището на кондиционния пласт и забоя на сондажа. Горната част на тялото е „изрязана“ по данни за топографията на терена, а долната по забоя на сондажите. Методът на изчисляване, използван от софтуера, е „тежести обратнопропорционални на разстоянието“, при размер на блоковете 10/10/10 m. Разломната плоскост, показана с червен полупрозрачен цвят и син контур на фиг. 5, е изчертана допълнително за информация на читателя. Тя не участва в изчисленията, тъй като в процеса на генериране на блоков (Voxel) модел, няма зададена функция, която да позволи това.

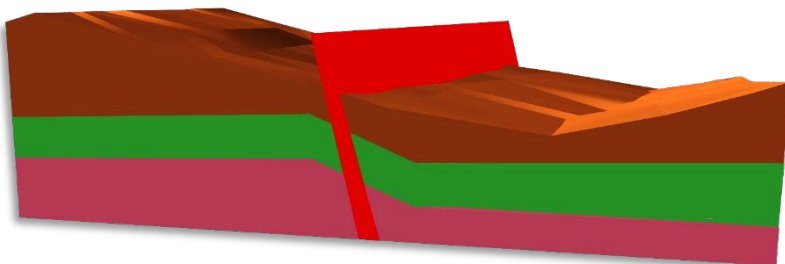


Фиг. 5. Блоков модел (воксел) по сондажни данни, изготвен в Discover (MapInfo), чрез статистическа обработка (IDW). Трите цвята показват три литоложки разновидности, със син контур е добавена разломна плоскост (фиг. 36), установена при картирането и сондирането. Разломната плоскост остава неотчетена от статистическия алгоритъм.

На генерирания модел, продуктивният пласт (зеленият) претърпява известно отместване в близост до разломната плоскост, но при задълбочено разглеждане на модела става ясно, че границата на отместване не е една наклонена плоскост, а общо три вертикални, като на практика те не съвпадат с разлома. Както е показана на фигурата, тази разлика може да изглежда незначителна, но грешното пространствено

разполагане на кондиционните скали води до неточност от около 10% от общия им обем.

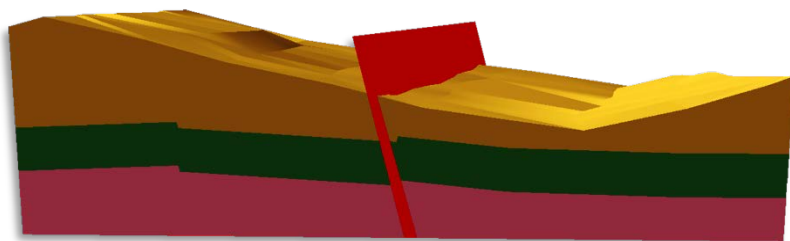
Като друг пример за проблемно моделиране може да се посочи изчисляването с помощта на ArcGIS. На фиг. 6 е показан модел, методът за изчисляването на който също е „тежести обратнопропорционални на разстоянието“. Тук софтуерът не създава модел, изграден от множество блокчета, а построява обемни тела между GRID повърхнини. Тези повърхнини се получават от сондажните данни, обработени статистически.



Фиг. 6. Модел по сондажни данни изготвен в ArcGIS, чрез статистическа (IDW) обработка. Червената плоскост е добавена за онагледяване, но не е отчетена от алгоритъма на изчисление (останала е незабелязана от статистическата обработка).

На фигурата се виждат трите литоложки типа и плоскостта на разлома. За разлика от Discover в ArcGIS се забелязва наклонена плоскост, но тук наклонът е около 40°, докато истинският наклон е 80°. Това се дължи на факта, че макар и с по-малка тежест, в изчисляването на позицията на границата на пласта участват различно отдалечени точки при определянето на височината на всяка клетка от GRID повърхнината. Въпреки очевидните неточности, именно този подход често се използва за моделиране на полезни изкопаеми, без да се вземат предвид структурните данни, което води до твърде големи отклонения в обема и пространственото положение на геоложките запаси.

Кригинга е широко използван при проучванията за рудни полезни изкопаеми, при които се обработват хиляди проби с изчислени съдържания на даден елемент. В тези случаи, към настоящият момент той е незаменим, но при малко количество информация той губи своята сила. Поради това най-лоши резултати в теста дава използването на „Кригинг“ и по-конкретно универсалния такъв. На фиг. 7 е показан модел, изграден в ArcGIS на базата на този метод. В своята същност кригинга е създаден за обработване на информация в еднородна среда. Основният проблем за решаване при кригинга е определянето на оптимални тегла, с които да се отчитат отделните проби при оценка на средните в блоковете. Тази задача не може да се решава без някои предположения за геостатистическите характеристики на изучавания обект. Условието за еднородност на залежа е обезателно. В противен случай задачата се свежда до оценка на обедняването на полезното изкопаемо (Bakardjiev, Vandev, 2006). В болшинството от случаите обаче, еднородна геоложка среда не съществува. Сравнено с IDW метода, кригинга на първо място използва повторемостта на точки със сходни параметри в зададена зона на търсене, а разликите в разстоянията попадащи в зоната имат второстепенно значение. Ето защо използвайки го, на практика елиминираме рязката граница при разпространението на полезното изкопаемо и затова на фигурата не се отчита никакво значително разместване.

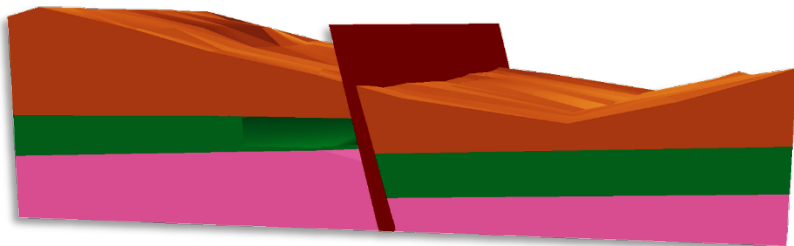


Фиг. 7. Модел по сондажни данни изготвен в ArcGIS, чрез статистическа (Kriging) обработка. Червената плоскост е добавена за онагледяване, но е пропусната от статистическия алгоритъм.

Основният недостатък на двата метода – „Кригинг“ и „тежести, обратнопропорционални на разстоянието“ е, че за тяхната работа се разчита на множество еднотипни данни (напр. съдържанието на даден химически елемент), но в геоложката практика би следвало да се интегрира разнотипна геоложка информация: съдържание на даден компонент; границите на разпространение, породени от структурни, литоложки, стратиграфски или геоморфоложки причини и др.

Правени са опити за включването на разломи при моделирането чрез статистическа обработка. Използвайки възможностите на ArcGIS, Price (2014) посочва начини на моделиране, използвайки следите на разломите, като ограничения (barriers) при “Кригинг” моделиране. В неговата работа обаче ясно се виждат няколко основни недостатъка. Линиите на следите, посочващи разломните нарушения са двумерни криви линии без тримерно геолошко дефиниране. Подходът на Price е подходящ за онагледяване на разломена геоложка повърхност, но в реална геоложка триизмерна среда този метод на практика е неприложим, освен в частния случай на вертикално разломяване.

Посочените на фигурите по-горе модели са направени без специална първична обработка на данните, така както нерядко се използва при понискобюджетните проучвания. Използването на различни вариограмни модели (сферичен, гаусов, експоненциален и т.н.) съобразени с геоложката ситуация, до голяма степен биха могли да подобрят геоложкия модел. В много случаи обаче, поради не достатъчна геоложка изученост, съществуването на прекъснатостите не е установено и те не се залагат в блоковия модел. Структурните, стратиграфските, а понякога и геохимичните бариери в разпространението на полезното изкопаемо, са геометрично дефинирани (Ragan, 2009) и би следвало да се разглеждат като такива. На фиг. 8 е показан модел за оконтуряване и изчисляване на запаси от стратифицирано, тектонски контролирано полезно изкопаемо, изграден по геометричен принцип, използвайки същите данни, като при горните примери.



Фиг. 8. Модел на стратифицирано, тектонски контролирано полезно изкопаемо, изграден по геоложки геометричен принцип в ArcGIS.

Един от вариантите за геометрично моделиране е “Методът на ограничителните повърхнини” (Съчков и Димитров, 2012), който детайлно ще бъде разгледан в глава пет. Този метод позволява намеса на геолога в моделирането, като при това предлага гъвкавост, бързина и точност на изчисленията, превъзхождащи тези на „класическите“ методи.

4. СПЕЦИАЛНА ЧАСТ – ПРОБЛЕМИ ПРИ ГЕОМЕТРИЗАЦИЯТА НА ГЕОЛОЖКИ ТЕЛА С ПОМОЩТА НА GIS И CAD СОФТУЕР

Разработен в съгласно тематиката на специалността „Методи и техника на геоложките изследвания“, този труд разглежда възможностите за развитие на методите използвани при моделирането на тримерни геоложки тела изчисляването на техните обеми. Една от поставените цели тук е създаването на един съвременен, бърз и точен метод за изчисляване на запасите, който да се отличава и с универсалност в различни геоложки обстановки. За постигането на това специалната част е разделена на четири:

- Разглеждане на същността на метода на ограничителните повърхнини;
- GIS и CAD геометрични решения на за моделиране на геоложки тела по метода на ограничителните повърхнини;
- Представяне на създадените програмни приложения, подпомагащо геометричното моделиране на геоложки тела;
- Демонстриране на приложимостта на представените решения при реални геоложки обекти.

Тези четири части представят основните задачи поставени в този труд.

4.1. Метод на ограничителните повърхнини

Предложеният тук метод, макар и не напълно удачно, може да бъде наречен Метод на ограничителните повърхнини (МОП). В исторически план, математическия апарат на който е базиран метода, не е нов. Новото е, че прилагането на тези изчисления към момента е възможно с използване на голямо количество входяща геоложка информация, като се използва компютър с инсталиран CAD или GIS продукт. МОП има известно сходство с коментираният вече метод на триъгълниците, използван от част от маркшайдерите, тъй като чрез него се постига изчисляването на елементарни обемите на триъгълни призми.

Често пъти, особено когато целта е да се отчете долната граница на стратиграфски определен пласт или при проучване на интрузивно тяло, където химичните и физични показатели на практика не се изменят в целия обем на проучваната площ, се проектират и изпълняват малко на брой сондажи. Това от своя страна води до генерализиране на топографските контури и на повърхностите, ограничаващи блоковете. Именно тук е и основната разлика между класическия метод на триъгълниците и Метода на ограничителните повърхнини.

Новост е идеята за създаване на възможности за интегриране на разнотипна геоложка информация, която да детайлизира и да повиши достоверността на моделираното тримерно тяло и изчисленията му обем. Тази детайлизация е възможна, тъй като при метода на ограничителните повърхнини създадените триъгълници могат да бъдат различни за отделните търсени граници: топографска повърхнина, граница между отквивката и суровината, долна граница на

изчисляемите запаси и др. Това е възможно, понеже при компютърното генериране и сравняване на повърхнини от триъгълници е възможно добавянето на произволен брой нови точки в равнината на всеки отделен триъгълник, естествено без това да променя неговата форма. Това позволява използването на значително по-голямо количество различна информация при изчисляването на обеми от полезни изкопаеми.

4.2. GIS и CAD геометризация на геоложки тела чрез метода на ограничителните повърхнини

Метода на ограничителните повърхнини, както вече беше казано не представя изцяло ново решение на ниво математика. Основният аргумент на метода са възможностите за неговото модифициране за по-добра приложимост в различни геоложки обстановки. В тази глава са разгледани именно възможностите за интегриране на разнотипна геоложка информация за получаване на детайлни и по-точни тримерни модели изобразяващи реалното геолошко тяло.

Разгледани общо осем геоложки проблема и са представени техните решения, а именно:

- Геометризация на тела при силно разчленен терен;
- Геометризация на хоризонтални слоисти тела;
- Геометризация на геоложки тела, разместени по вертикална разломна плоскост;
- Геометризация на геоложки тела, разместени по наклонена разломна плоскост с помощта на метода на посочните косинуси;
- Геометризация на гънки (синклинали и антиклинали) с помощта на метода на посочните косинуси;
- Геометризация чрез интерполация на лещовидни тела с променлива дебелина;
- Геометризация на обеднени обеми контролирани от разломни зони
- Геометризация на тела със сложна форма и нуждата от комбиниране на геометрична и статистическа обработка

Представените геоложки ситуации и решенията им далеч не са всички възможни, но е направен опит да се разгледат най-често срещаните проблеми. Това би могло да се използва за основата на

направление в компютърното моделиране приложимо най-вече за индустриалните минерали и скали, и инженерно геоложки модели.

В автореферата, към дисертационния труд е отделено внимание само на по-съществените от тях.

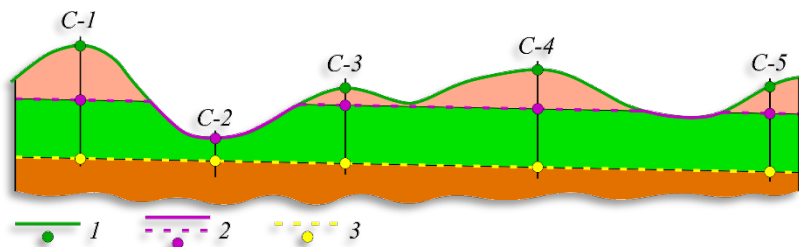
4.2.1. Геометризация на тела при силно разчленен терен

В методиката на работа при използването на никой от „класическите“ методи за изчисляване на геоложки запаси не е разгледан проблема с формата на релефа. На практика той не е смятан за част от геологията, поради което не следва да принадлежи на геоложка интерпретация. Това разбира се не е точно така, формата на релефа зависи до голяма степен именно от геологията в разглеждания регион. Зависи от литоложкия състав на скалите, тектонската активност в района и т.н. Тук обаче няма да се разглеждат точно тези особености на релефа. В този труд е обърнато по-скоро внимание на възможностите за отразяване на плавните и резки промени в наклона и ориентацията на терена, а не от факторите допринесли за тези изменения.

Едно от основните предимства на метода на ограничителните повърхнини е именно във възможността за детайлно представяне на трена независимо от неговата разчлененост и всички възможни изменения в обема на полезното изкопаемо и покриващите наслаги произтичащи от неговата форма. Може да се направи сравнение с най-често използвания метод в геоложките проучвания, а именно метода на геоложките блокове. При него изчисляванията стават на средноаритметичен принцип само по данни от сондажите. В такъв случай е много важно дали тези сондажи ще бъдат реализирани предимно в по-издигнати части, където е възможно откритката да бъде по-дебела или в части където на практика такава липсва (фиг. 9). Поради това е необходимо сондажната мрежа да бъде максимално гъста така, че да успее да покрие равномерно всички негативни и позитивни форми на терена. От друга страна, използвайки векторни повърхнини, ние можем да използваме не само данните от сондажите, а и данни от геоложката картировка и геодезическото заснемане на терена (фиг. 9).

По този начин за изчисляване на различните повърхнини се използва различно количество информация, докато при метода на геоложките блокове това е невъзможно. Това разбира се не е възможно при всички

геоложки ситуации, но когато проучването се извършва в не твърде деформирано пластово или масивно тяло е възможно със сравнително малко подземна информация да се получи достоверно решение. Вариантите със структурни изменения в масива, разбира се също са приложими и са разгледани в следващите глави.



Фиг. 9. Схема на изчисляването на обеми по метода на ограничителните повърхнини при силно разчленен релеф. За разлика от „класическите“ методи използващи само данни от сондажи, тук се използва и много друга информация.

1 – Данни за терена (горна граница на откривката), получени по данни от сондажите, теренна геодезическа снимка и геоложка картировка; 2 – Данни за горната граница на полезното изкопаемо, получени по данни от сондажите, теренна геодезическа снимка и геоложка картировка и интерпретация; 3 – Данни за долната граница на полезното изкопаемо, получени от сондажите и геоложка интерпретация.

Като следващо предимство на метода на ограничителните повърхнини при моделирането на топографските характеристики на изследвания район трябва да се посочи и възможността за детайлно отразяване на силно разчленен релеф получен от предходна стопанска дейност.

Всеки един обект в който се извършва добив на полезни изкопаеми е подложен на множество допълнителни изследвания в етапа на експлоатационното проучване. Използвайки метода на геоложките блокове обикновено се създават отделни блокове за всеки отделен

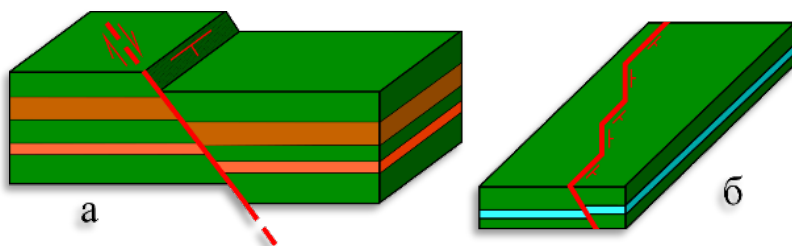
минен хоризонт като единствено така до някаква степен се отразяват обемите във вече разработено находище. Този подход в известна степен не е лош, но се губи геоложката обвързаност на отделните блокове в масива, като по този начин трудно се отразяват геоложките ограничения влияещи на повече от един блок. По тази причина в съвременните софтуерни похвати е възприето целият масив да се разглежда като един обект, а не като отделни блокове. Използването на GRID повърхнини или Voxel модели, не дава желаните крайни резултати, тъй като те трудно отразяват силно разчленения терен в следствие на напредналия добив. От друга страна TIN повърхнините биха могли лесно да очертаят ръбовете на стъпалата в котлована, след като те вече са били зададени като тримерни полилинии. Това предполага значително по-голяма достоверност на обемното тяло. Освен това работата с тримерните полилинии дават възможност за бърза и лесна промяна на генерираната повърхнина, използвайки възможно най-актуална информация.

4.2.2. Геометризация на геоложки тела, разместени по наклонена разломна плоскост с помощта на метода на посочните косинуси

Този метод е специално разработен от автора на дисертационния труд въз основа на структурно геоложка методика и не може да бъде намерен в литературните източници третиращи приложенията на GIS и CAD софтуерите за геоложки цели.

Докато отчитането на разломни зони без отчитане на преместване по тях, то геоложките ситуации възникващи около наклонени разломни зони със забележимо отместване по тях силно затрудняват прилагането на статистическите методи на моделиране в GIS среда (Съчков 2015).

За целите на моделирането разломните повърхнини могат да се приемат за наклонени (Съчков, 2015) плоскости (фиг. 10 а). Това означава, че измервайки усреднената ориентация на разлома можем с достатъчна точност да моделираме плоскостта на преместване в едър мащаб. Разглеждайки даден разлом, като голяма (регионална) структура, той може да се представи като последователност от плоскости, сключващи определен ъгъл помежду си (фиг. 10 б).



Фиг. 10. Модели на разломни повърхности. а – усреднена повърхност за локално моделиране на разсед, б – поредица от разломни плоскости, образуващи разлом с регионално разпространение.

Етапи на работа

При моделирането на разломната повърхнина се преминава през няколко етапа:

1. Теренна работа – тук се включват теренните измервания на страната и наклона в колкото може повече точки от разломната повърхност. При сондажни работи се прилага методът на трите точки или се интегрират данни от ориентирана ядка или частично ориентирана ядка. Координатите на мястото на всяко измерване се записват с помощта на GPS приемник приемйки котата на терена (табл. 1). Задължително е поне едно от измерванията да се намира на границата между незасегнатия терен и разломната плоскост. Останалите измервания могат да бъдат навсякъде по образувалия се при разломяването шарп или друга коса на него повърхнина.

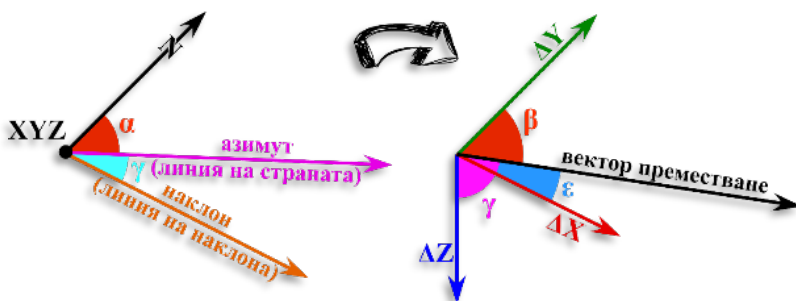
2. Чрез филтриране на информацията в Excel се определят правдоподобните данни за моделиране на самостоятелна плоскост.

3. Чрез усредняване на стойностите на измерванията по линията на страната и линията на наклона се приема една генерална ориентация на разломната плоскост.

Таблица 1. Примерна таблица за отчетените на терена данни.

№ изм.	X (E)	Y (N)	Страна (α)	Наклон (γ)	Тип на структурното измерване
1	699078.00	4717354.00	125°	62°	Разломна плоскост
2	699082.00	4717365.00	120°	60°	Разломна плоскост
3	699070.00	4717340.00	122°	65°	Разломна плоскост

4. Средните стойности за страна (α) и наклон (γ), можем да придадем на някоя от измерените точки на границата между незасегнатия терен и разломната плоскост. Чрез една известна точка с координати XYZ, и елементи α и γ , която лежи на плоскостта, можем да създадем неограничен брой копланарни нови точки. Изчисленията се базират на формулите за преход между посочни косинуси (фиг. 11) и геоложки елементи по структурно измерване (Ramsay, 2000), модифицирани по определен начин (Съчков, 2015). Модификацията позволява да се генерират допълнителни точки, определящи насочени прави по посока на пласта, по потъването обратно на потъването на пласта.



Фиг. 11. Геометрична схема на елементите, участващи при прехода от геоложки (страна и наклон) към декартови (XYZ) координати, чрез посочни косинуси.

Така например, за да получим координатите на точка, намираща се на разстояние S , по посоката на разпространение на пласта от-ляво или от-дясно на началната точка (фиг. 12 а), можем да използваме следните формули (Sachkov, Dimitrov, 2013):

За точка намираща се в-дясно от изходната точка:

$$\Delta X = S * \sin(\alpha_1 + 90^\circ);$$

$$\Delta Y = S * \cos(\alpha_1 + 90^\circ);$$

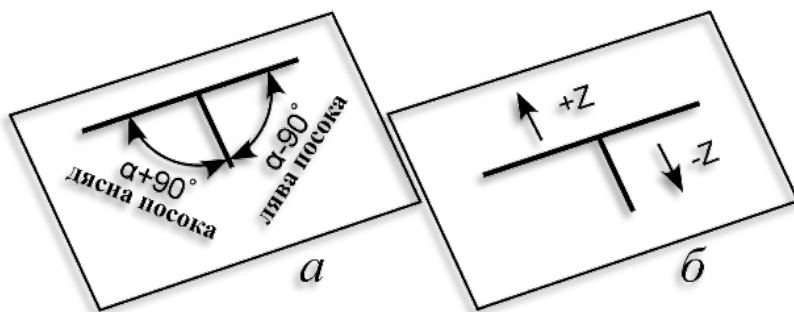
$$\Delta Z = 0$$

За точка намираща се в-ляво от изходната точка:

$$\Delta X = S * \sin(\alpha_1 - 90^\circ);$$

$$\Delta Y = S * \cos(\alpha_1 - 90^\circ);$$

$$\Delta Z = 0$$



Фиг. 12. Конвенции за пространственото положение на ново генерираните точки. А – при изчисляване на точките, разположени по посока на разпространение на пласта; В – при изчисляване на точките, разположени по потъването и обратно на потъването на пласта.

За получаване на координатите на точка, намираща се на разстояние S от изходната точка, по потъването на пласта (фиг. 12 б) формулите добиват вида:

Изчисляване за точка разположена под изходната точка (по потъване) се извършва чрез:

$$\Delta X = S * \sin \alpha_1 * \cos(180^\circ - \gamma_1);$$

$$\Delta Y = S * \cos \alpha_1 * \cos(180^\circ - \gamma_1);$$

$$\Delta Z = S * \sin(180^\circ - \gamma_1)$$

Изчисляване за точка разположена над (обратно на посоката на потъване т.е. по задигане) изходната точка:

$$\Delta X = S * \sin(\alpha_1 - 180) * \cos \gamma_1;$$

$$\Delta Y = S * \cos(\alpha_1 - 180) * \cos \gamma_1;$$

$$\Delta Z = S * \sin \gamma_1$$

Изчислените по-горе ΔX , ΔY , ΔZ представляват отместванията по трите оси на новите точки, като реалните координати се изчисляват по формулите:

$$X_n = X_1 + \Delta X;$$

$$Y_n = Y_1 + \Delta Y;$$

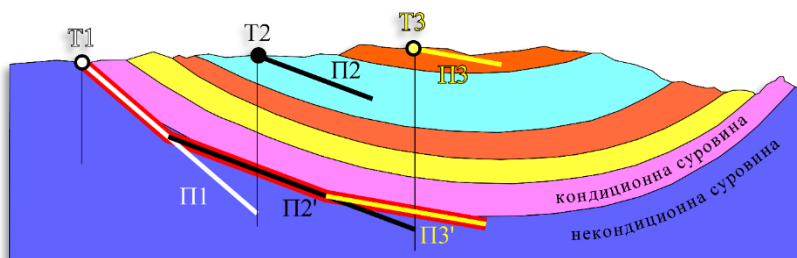
$$Z_n = Z_1 + \Delta Z$$

4.2.3. Геометризация на гънки (синклинали и антиклинали)

Моделиране на гънка по метода на посочните косинуси е по-сложен процес. Формата на една гънка се определя от твърде много параметри, поради това точната и форма и нейното пространствен положение не могат да бъдат моделирани с достатъчна достоверност. Ако разглеждаме геоложката гънка от чисто всеобхватна научна гледна точка, споменатият песимизъм е оправдан, но за нуждите на търсещо-проучвателните дейности сложните дефиниции не са необходими. Тук се предлага подход на работа, който няма да доведе до идеално

представяне на дадена гънка, но би дал достатъчно точни резултати за пресмятане на търсения обем в геоложкото пространство.

Подобно на моделирането на разломи и тук се използват усреднени равнини, но за разлика от разломите тук група от плоскости се използва за описване на всяко от бедрата на гънките (фиг. 13).



Фиг. 13. Модел на гънка и начина за нейното представяне с апроксимиращи плоскости. Плоскости по три групи от точки (T1, T2 и T3) са P1, P2, P3, а P2' и P3' са техните проекции в дълбочина.

Етапи на работа

Процесът на моделиране се състои от няколко стъпки:

1. Теренно картиране – измерване и записване на координатите на значителен брой структурни измервания подобно на работата, необходима за моделиране на разломна повърхнина.

2. Сортиране и филтриране на данните в Excel. На базата на пространственото положение на точките и измерените в тях страна и наклон на пластовете се оформят от 2 до 10 и повече групи от точки за всяко едно от бедрата на гънката. Броят и размерът на групите зависят от размера на гънката, мащаба на картиране и търсената детайлност. Повече групи означават по-детайлизирани бедра, но и повече работа. Към момента разработеният алгоритъм обработва до 4 групи за всяко бедро на геоложка гънка.

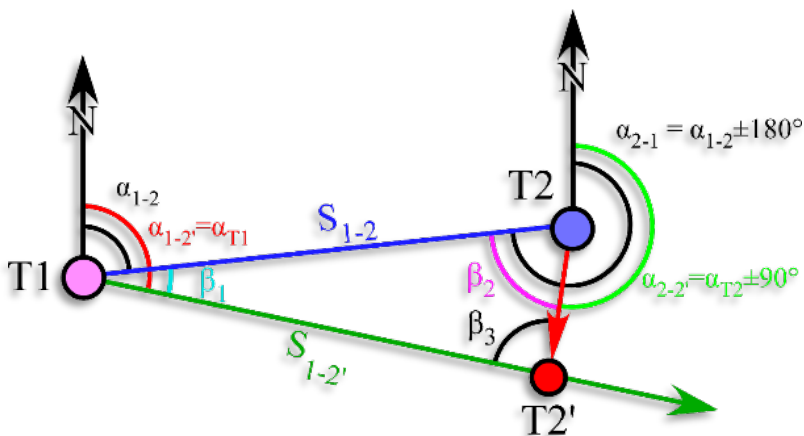
3. Аналогично на работата при моделиране на разломна повърхнина, чрез пресмятане на средни стойности за страна и наклон, намираме генерализираната ориентация на всяка допирателна към гънковата крива. За първата плоскост задаваме координати на граница

по някакви практически съображения, например между кондиционна и некондиционна суровина (T_1 на фиг. 59), разкриваща се на повърхността на терена.

4. За координати на другите изчислени точки се избират усреднени координати на точките, които попадат в съответната група, като по-голяма тежест при изчислението имат точките с по-близки първични стойности за страна и наклон до получените при тяхната обработка. Така например, ако в дадена точка има измерени α и γ равни на усреднените, то при изчисляването на новите координати, тя трябва да получи по-голяма тежест спрямо друга точка, при която α и γ се разминават чувствително с усреднените.

5. За обединяването на отделните плоскости в една крива повърхнина, описваща бедро на гънка, е необходимо всяка от базовите точки (изчислените в т.3 и т.4) да попада върху вектора по посока на потъването на пласта на предходната точка (фиг. 14). Така например, ако в точка 1 посоката на потъване на пласта (линия на страната) има ориентация 112° , то векторът между точка 1 и точка 2 трябва да има посочен ъгъл 112° и дължина в зависимост от координатите на точките. Това изискване се спазва, като се направи преместване на втората точка (от T_2 към T_2') по посоката на разпространението на пласта – ъгълът на страната $\pm 90^\circ$ (червена линия на фиг. 14), до пресичането и с вектора, посочващ линията на страната в първата точка (със зелен цвят на фиг. 60). Това на вид сложно изчисление се свежда до лека модификация на геодезическата задача „Права засечка с посочни ъгли“ (Пеевски и др., 1975), където посочните ъгли се явяват ъглите спрямо севера и линията на страната в двете точки.

6. При известни координати на двете точки може да се намери векторът между тях, S_{1-2} е неговата дължина, α_{1-2} е посочният ъгъл на $\overrightarrow{12}$, а съответно α_{2-1} – на $\overrightarrow{21}$. Њгъл β_1 (фиг. 14) е равен на разликата между α_{1-2} и $\alpha_{1-2}' = \alpha_{T_1}$ (ъгълът на линията на страната).



Фиг. 14. Схема на латералната корекция на базова точка спрямо предходната. T1 – първа базова точка с известни XYZ координати, T2 – втора първична базова точка с известни XYZ координати, T2' – втора коригирана базова точка преместена по XY спрямо T2.

Поради различните възможности за пространствени взаимоотношения между двете точки и ъгълът на линията на страната, измерените ъгли могат да попадат в различни квадранти на координатната система. Всеки от ъглите в един триъгълник може да бъде в границите от 0° до $179,9^\circ$, при сбор на ъглите не по-голям от 180° . Това означава, че β_1 е равен на абсолютната стойност на разликата между α_{1-2} и $\alpha_{1-2'}$.

$$\beta_1 = |\alpha_{1-2} - \alpha_{1-2'}|$$

Ъгъл β_2 се намира по аналогичен на β_1 начин. Тук обаче посоченият ъгъл $\alpha_{2-2'}$ се получава, като към измерения ъгъл на страната (α_{T2}) се добавят или извадят 90° в зависимост от квадранта, в който той се разполага, а ъгъл α_{2-1} е равен на $\alpha_{1-2} \pm 180^\circ$ в зависимост от това дали α_{1-2} е по-голямо или по-малко от 180° .

Ъгълът $\beta_3 = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)$. От тук при три известни ъгъла и една страна (S_{1-2}), се намират другите две страни на образувалия се триъгълник ($S_{1-2'}$ и $S_{2-2'}$).

Координатите на новата точка ($T_{2'}$), представляваща преместената точка T_2 се пресмятат по формулите:

$$\begin{aligned} X_{2'} &= X_1 + \sin \alpha_{1-2'} * S_{1-2'} = X_2 + \sin \alpha_{2-2'} * S_{2-2'} \\ Y_{2'} &= Y_1 + \cos \alpha_{1-2'} * S_{1-2'} = Y_2 + \cos \alpha_{2-2'} * S_{2-2'} \\ Z_{2'} &= Z_1 \end{aligned}$$

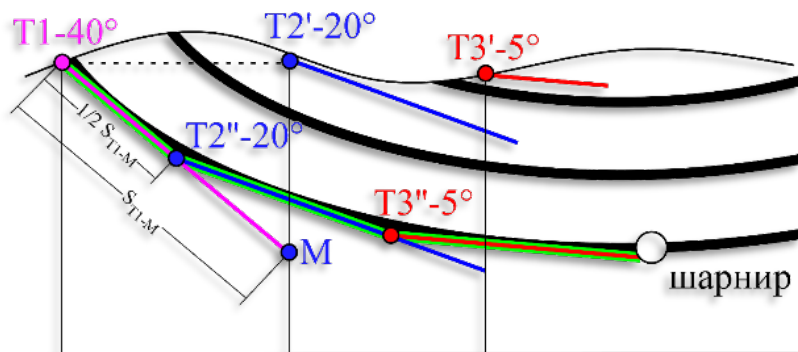
X и Y се пресмятат спрямо двете точки (T_1 и T_2), за да може да се направи проверка, като двата резултата трябва да бъдат еднакви.

За кота (Z) на новата точка се придава котата на T_1 , това дава възможност да разглеждат точките в хоризонтална равнина. Корекциите на котите на точките се правят на следващ етап, когато се налага и още една промяна на X и Y. Аналогично се извършват и корекциите за следващите базови за отделните плоскости точки.

7. След като базовите точки са коригирани по X и Y, те се подреждат в хоризонтална равнина. Получава се полилиния, начупена според ъгъла на линията на страната на всяка предходна точка. Тази полилиния е двуизмерна, поради което се налага на изграждащите я точки да бъде зададена кота, за да може да се образува триизмерно тяло. На първата точка се придава котата на терена, но на следващите е необходима корекция по вертикала за да може плоскостите, генерирани от тях, да се пресичат в пространството в обхвата на гънката. Методиката на това преместване на точката е следната:

Построява се триъгълник $T_1T_2'M$ (фиг.15). Точка M се явява пресечната точка на правата от точка T_1 , спусната по ъгъла на наклона (γ_1) на пласта и вертикалната линия, спусната от T_2' (фиг. 15). Котите на T_1 и T_2' са равни, следователно линията между тях е хоризонтална, линия $T_2'M$ е вертикална, така ъгълът $T_1T_2'M$ е равен на 90° (β_4). Ъгълът при върха T_1 - β_1 , е равен на γ_1 . Така намираме ъгъла $\beta_5 = 90^\circ - \gamma_1$. Страната $S_{1-2'}$, е вече известна, така дължината на страната S_{1-M} се намира по формулата

$$S_{1-M} = \frac{S_{1-2'}}{\sin \beta_3}$$



Фиг. 15. Схема на корекция на базова точка според Z на предходната. T1 – първа базова точка с известни XYZ, T2' - втора коригирана базова точка с изчислени XY. С M е означена проекция на точка T2' по вертикала. Точка T2'' е крайна позиция на втора коригирана базова точка преместена по XYZ спрямо T2'.

В точка T2 е отчетен наклон различен от този в T1. В общия случай гънката е плавно променяща се крива, поради това промяната в нейния наклон е плавна. Тази крива обаче, е трудна за моделиране, поради което се замества с множество плоскости. Наклонът, отчетен в дадена точка, не важи само за тази точка, а по-скоро за определен периметър около нея. За решението на разглежданата задача е прието, че границата между зоните с определен наклон се намира по средата между изчислените базови точки. Така T2'' се проектира по средата между T1 и M. Координатите на T2'' се намират по формулите:

$$X_{2''} = X_1 + \sin \alpha_{1-2'} * \frac{S_{1-2'}}{2}$$

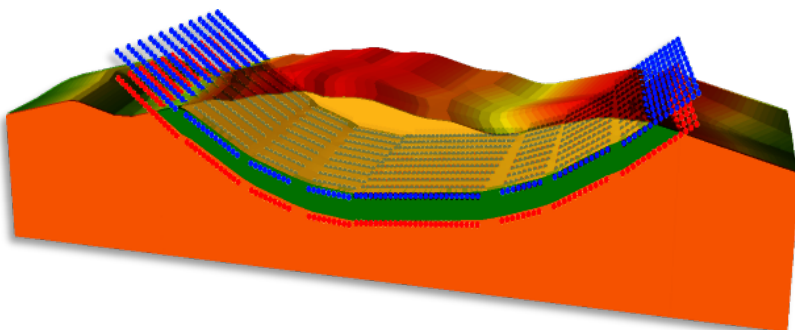
$$Y_{2''} = Y_1 + \cos \alpha_{1-2'} * \frac{S_{1-2'}}{2}$$

$$Z_{2''} = Z_1 + \cos(90^\circ + \gamma_1) * \frac{S_{1-M}}{2}$$

Точка T1 се намира на терена и за нея са известни петте нужни компонента (XYZ, α и γ), за да се моделира плоскост. Аналогично на моделирането на разломна плоскост се задават броя и разстоянието между генерираните допълнителни точки, над, под и отстрани на

базовата точка. За долна кота на производните (допълнителните) на T1 точки се приема котата на T2 (T2“).

Набор от всичките генерирани точки оформя отделни равнини представляващи крива повърхност близка до реалната форма на геоложка гънка (фиг. 16). Генерирането на няколко такива повърхнини дава възможност да се дефинира горната и долната граница на дадено геоложко тяло.



Фиг. 16. Тримерен модел на дефинирането на геоложко тяло по масиви от точки.

Ограничения на входните данни

За да бъде коректно моделирането на гънки, се налага да бъдат изпълнени няколко условия. Получените усреднени ъгли за посоката на затъване на пласта (ъгъл на линията на страната) между две съседни базови точки не трябва да надхвърля 10° . Например ако за страна на пласта в точка T1 е изчислен ъгъл от 112° , то за T2 ъгълът не трябва да е по-голям от 122° и по-малък от 102° .

Причината за горното ограничение е, че често пъти в един и същ регион са наложени две и повече последователни гънкови деформации (гънкови генерации), което води до интерферентен гънков рисунок (Ramsay, 1967). Обикновено по-късните гънкови форми са по-отчетливи, но значението им зависи от мащаба на работата. Използването на структурни елементи, от различни пространствени домени на една пренагъната гънка може да доведе до заблуждаващи

резултати. Отклонението от 10° е избрано и поради факта, че в общия случай на терена геолозите не използват по-точния клинометър, а капака (плочката) на компаса. Това води до точност на измерванията около 5° . По този начин при две измервания разликата в отчетите може да достигне 10° , като същевременно става въпрос за една и съща ориентировка.

При корекцията на положението на дадена точка (T2), освен ъгловите и взаимоотношения с предходната (T1) от значение е и разстоянието между тях. За да е сигурно, че става дума за една и съща гънка, отместването не бива да бъде твърде голямо. Допустимата промяна на разстоянието между първичните точки (S_{1-2}) се определя по формулата:

$$S_{1-2} - S_{1-2'} < \frac{S_{1-2}}{100}$$

На практика това означава, че при разстояние 100 m между двете първоначални точки, новата точка (T2') може да се премести в радиус 10-15 m, в зависимост от разликата в ъглите α_1 и α_2 . По този начин се минимизира възможността при моделирането да се използват данни от различни гънки.

4.2.4. Геометризация чрез интерполация на лещовидни тела с променлива дебелина

В този труд е разгледан проблема и е предложен метод за представяне на изклинването на пластовите тела и прекъснатостите в масивните скали. В родната практика такива често се налага да се моделират, когато става дума за неиздържани тела, като например в палеогенските въглищни басейни, на примера на бобовдолските, каолините от североизточна България, zeолити, перлити и бентонити от Източните Родопи, магнетитови тела от странджанските скарнови находища и много други. Накратко тези тела ще бъдат наричани, макар и не винаги съвсем коректно с общото название „лещи“. За представянето на лещите с ограничителни повърхнини трябва да се зададат тримерните им външни граници. Подходът е твърде различен спрямо популярните софтуерни похвати, но в известна степен е близък

до използвания класически похват при оконтуряването между кондиционен и стерилен сондаж (Попов и Бакърджиев, 1985). В класическия похват авторите са описали два основни случая, когато се използва интерполация между продуктивен и извънкондиционен сондаж (или друга изработка) или екстраполация, когато се използват данни от допълнителен продуктивен сондаж стоящ в правата на първите два. За изчисляването на тези задачи се използват времеемки системи от уравнения с повече от три неизвестни, поради това обикновено в практиката се използва метода на ограничената екстраполация (Попов и Бакърджиев, 1985), който предвижда границата да се пада в средата на правата между двете изработки.

В разработения тук метод не се разглеждат само два съседни сондажа, а в изчисляването на разпространението на лещообразното тяло участие вземат и другите сондажи, не само тези между които се прокарва границата, като в същото време не се предвиждат сложни формули. Идеята за това произлиза от факта, че в общия случай и особено когато говорим за стратифицирани тела, те имат определена закономерност в тяхната форма. Ето защо, вместо прекъсване на тяхното разпространение точно по средата между две изработки се предвижда скъсяване до $1/3$ или удължаване до $2/3$ от дължината на правата. Разглеждат се четири основни случая (фиг. 17):

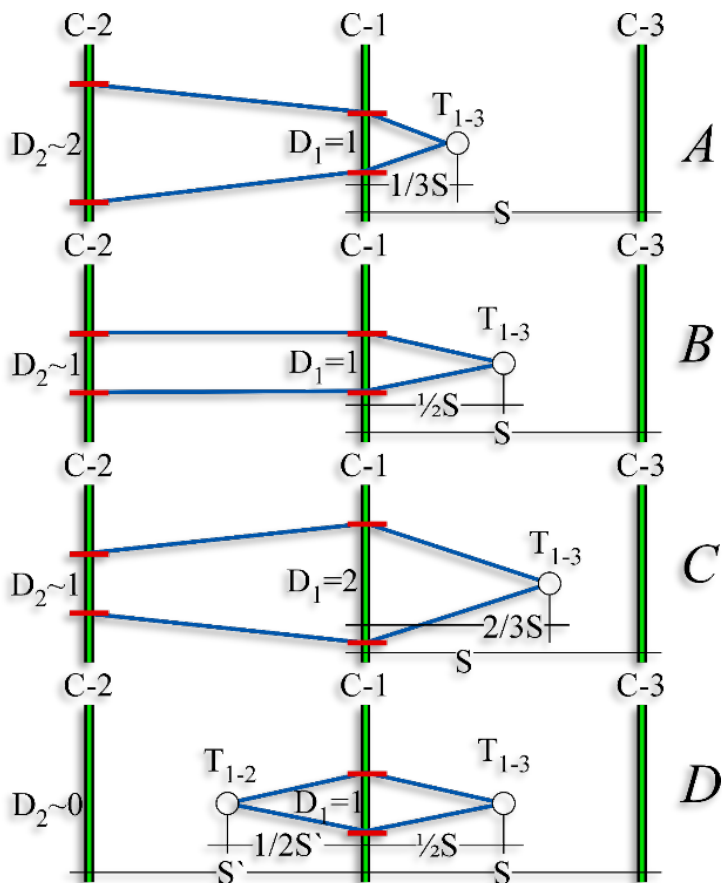
1. Когато тялото постепенно намаля своята дебелина до неговото пълно изкливане (фиг. 17А). Това означава, че по-отдалечената от непродуктивната изработка има дебелина по-голяма от тази на по-близката. В разработената тук методика се предвижда полезната дебелината между двете изработки да отговаря на изискването $D_2 > 1,5D_1$. Това означава, че ако близката изработка има продуктивна дебелина 1 m, то по-отдалечената трябва да бъде поне 1,5 m. В такъв случай се приема, че лещата изклива близо до най-външната продуктивна изработка, поради което граничната точка T_{1-3} има координати XY намиращи се върху правата C-1 – C-3 на разстояние от C-1 равно на $1/3$ от дължината на правата, където C-1 е продуктивната изработката.

2. Когато тялото е с константна дебелина до последната изработка в която то е подсечено (фиг. 17В). За такъв се определя случая в който $1,5D_1 > D_2 > 0,5D_1$, т.е. ако D_1 има дебелина 1 m, то D_2 да има също дебелина приблизително 1 m. В този случай понеже не може да се определи посоката на нарастване на тялото, няма как да се определи и

силата (скоростта) на неговото изклонване. Ето защо в представената тук методика е възприето правилото от метода на ограничената екстраполация, където координатите XU на новата точка T_{1-3} се намират в средата на вектора между изработките $C-1$ и $C-2$.

3. В случаите когато разглежданото геолошко тяло нараства на дебелина до прекъсването на неговото разпространение (фиг. 17C), задачата може да се разглежда като противоположна на първата. В този случай класическият метод на оконтуриране изисква използването на екстраполация, което води до решаване на система уравнения с три неизвестни (Попов и Бакърджиев, 1985), което е твърде трудоемка задача. Ето защо тук се предвижда единствено получените дебелини от изработките да отговарят на изискването $D_2 < 1,5D_1$, което означава, че ако дебелината D_1 е равна на 1 m, то дебелината D_2 трябва да е не по-голяма от 0,5 m.

4. Когато търсеното тяло е подсечено само в един в един сондаж, а в съседните не (фиг. 17D), то е невъзможно да се направи интерполация или екстраполация, която да може да бъде реално приета за абсолютно вярна. Поради тази причина за граница на разпространение на лещовидното тяло се приема половината от разстоянието между продуктивният и всички непродуктивни сондажи намиращи се около него.



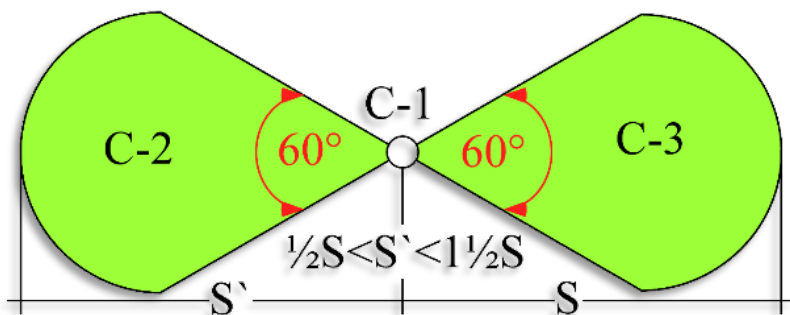
Фиг. 17. Схема на определянето на границата на разпространение на лещовидно тяло чрез интерполация и екстраполация между сондажи.

A – когато тялото постепенно намалява своята дебелина до пълното му изклинване; B – когато тялото запазва константна дебелина до отсъствието му в дадена изработка; C – когато тялото увеличава своята дебелина до момента на прекъсването на неговото разпространение; D – когато тялото е подсечено в единична изработка.

Използването на повече от два сондажа има за цел да покаже, че търсеното геолошко тяло не може да се разглежда като самостоятелен обект, а като част от цяла система. Независимо от причините за прекъсването на разпространението на тялото то отговаря на известни геометрични зависимости. Поради това, когато то излезне (изклинва) между две проучвателни изработки трябва да се провери за евентуална предвидимост в геометрията на пласта. Тази предвидимост е показана на фиг. 17, но трябва да се има в предвид, че не всеки сондаж би следвало да се приема като подходящ за определянето на скоростта на изклинване на тялото. Сондажите участващи в изчисленията би следвало да отговарят на няколко зависимости (фиг. 18):

- Разстоянията между сондажите не бива да са твърде различни. Когато разстоянията между сондажите $S_{C-1-C-2}$ и $S_{C-1-C-3}$ не са близки, то латералната изменчивост на лещовидното тяло би могла да не отговаря на посочения модел. Тук се приема, че никое от разстоянията не трябва да бъде по-голямо или по-малко с повече от половината от другото, т.е. $\frac{1}{2} S_{C-1-C-2} < S_{C-1-C-3} < 1\frac{1}{2} S_{C-1-C-2}$.

- Разглежданите сондажи би следвало да са приблизително в една права, в противен случай използването им като корективи е некоректно. Това следва от възможността тялото да има издържана големина в една посока, докато в друга да изклинва твърде бързо.



Фиг. 18. Схема на зоната на влияние на отделните изработки при определяне на положението на интерполираната граница на лещовидно тяло.

Интерполирането по описания метод би променило латералните граници на лещовидното тяло сравнено с общо възприетия похват, при който границата се прокарва по средата между продуктивен и непродуктивен сондаж (фиг. 19). Координатите X и Y на новите точки се изчисляват по формулите:

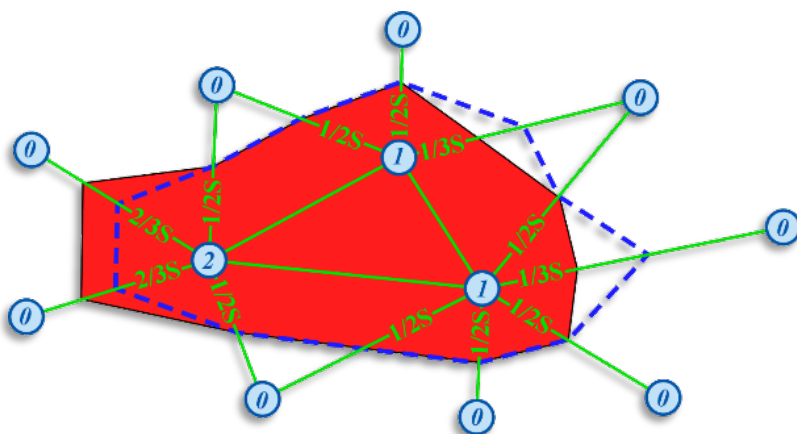
$$X_n = \sin \alpha * S'$$

$$Y_n = \cos \alpha * S'$$

където S' е равна на $1/3S$, $1/2S$ или $2/3S$, в зависимост от отношенията на дебелините описани по-горе, а α е посочният ъгъл, определен по следната формула:

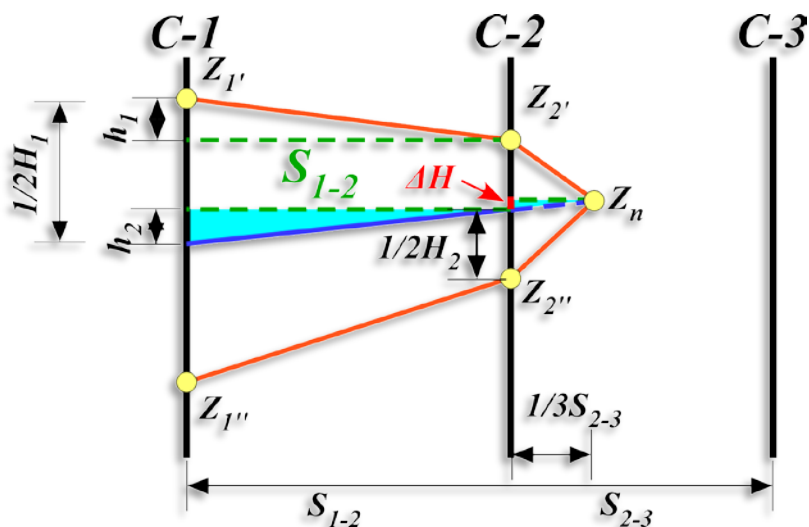
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} \right)$$

където X_1 и Y_1 са координатите на сондажа с подсечено полезно изкопаемо, а X_2 и Y_2 са координатите на стерилния сондаж.



Фиг. 19. Схема на генерирането на границата на лещовидното тяло. Със син пунктир е показана границата генерирана по средата между продуктивна и непродуктивна изработка. С червен полигон е показана площта, получена по разглежданата тук методика.

Полилинията – граница на лещовидното тяло не е двуизмерна, поради което трябва да бъдат определени и Z координатите (котата) на точките, които я съставят. Тези коти са в пряка зависимост от отношенията на дебелините на полезното изкопаемо в разглежданите продуктивни сондажи и котите, в които то е подсечено (фиг. 20).



Фиг. 20. Схема на изчисленията на новата кота при моделирането на лещовидни тела, чрез построяване на подобни триъгълници.

Новата точка дефинираща котата се намира на екстраполираната права дефинирана по средите на дебелините на измереното в сондажите полезно изкопаемо. За целта се построяват два правоъгълни триъгълника. На първият (фиг. 20) хипотенузата свързва точките от средите на дебелините на търсената суровина отчетена в сондажите, единият катет се явява перпендикулярът между двата сондажа (S_{1-2}), а вторият (h_2) изчислен по формулата:

$$h_2 = \frac{1}{2}H_1 - \frac{1}{2}H_2 - h_1$$

където H_1 и H_2 са отчетените по сондажите дебелини, а h_1 се определя по формулата:

$$h_1 = |Z_{1'} - Z_{2'}|$$

при $Z_{1'}$ и $Z_{2'}$ котите на горните граници на тялото.

Вторият триъгълник (фиг. 20) има една известна страна – част от перпендикуляра между продуктивния и непродуктивния сондаж, като дължината зависи от съотношения между дебелините, отчетени в двата продуктивни сондажа (тук е разглеждан случая от фиг. 17 А).

Хипотенузите на двата разглеждани правоъгълни триъгълника лежат на една права, два по два катетите са успоредни, едните са успоредни, а другите перпендикулярни на сондажните стволове. От тук следва, че двата триъгълника са подобни. Търсеният катет (ΔH) се намира по формулата:

$$\Delta H = \frac{S_{1-2}}{h_2 * \frac{1}{3}S_{2-3}}$$

Истинската кота на новата точка се намира по формулата:

$$H = \frac{Z_{2'} + Z_{2''}}{2} + \Delta H$$

когато

$$\frac{Z_{1'} + Z_{1''}}{2} < \frac{Z_{2'} + Z_{2''}}{2}$$

и

$$H = \frac{Z_{2'} + Z_{2''}}{2} - \Delta H$$

когато

$$\frac{Z_{1'} + Z_{1''}}{2} > \frac{Z_{2'} + Z_{2''}}{2}$$

като $Z_{1'}$, $Z_{1''}$, $Z_{2'}$ и $Z_{2''}$ са съответно горните и долните коти на търсеното тяло в двата продуктивни сондажа.

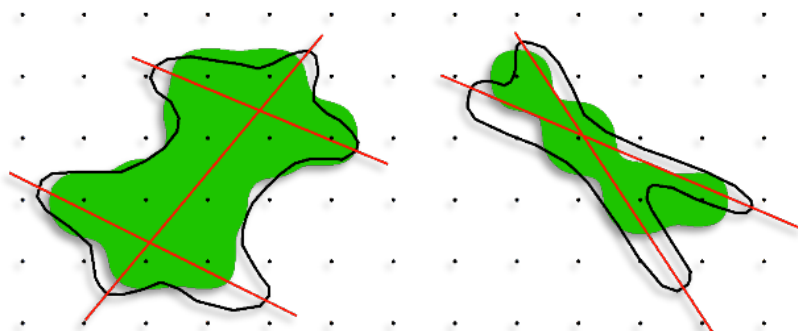
4.2.5. Геометризация на тела със сложна форма и нуждата от комбиниране на геометрична и статистическа обработка

Има много типове полезни изкопаеми, които не могат да се моделират единствено с геометрични методи, а се налага и използването на базирания върху статистическа обработка на данните похват. Това се налага, тъй като не рядко върху разглеждания обект има наложени твърде много геоложки събития, което налага определянето на неговата форма и размери като хаотични (несиметрични), спрямо заобикалящата го среда. Примери за такива форми са карстовите форми, телата образувани в следствие на хидротермални промени и т.н.

Параметрите на разпространението на суровината в тези случаи се приема за неизвестно. Реално обаче, това не е точно така. И двата гореспоменати процеса са свързани до голяма степен с тектониката в разглеждания район. Ето защо определянето на ориентацията на крехката деформация и съпоставянето и с моделираните обемни тела, могат ясно да очертаят връзката между тях.

Сама по себе си крехката деформация е по-лесна за представяне чрез преки теренни измервания на геометрията на пукнатини и разломи, но образувания по тях карст, често няма как да бъде точно предвиден. В такива случаи се налага моделиране по данни от сондиране (фиг. 21).

Развивайки максимално гъста според типа на полезното изкопаемо и неговата себестойност сондажна мрежа могат да се хванат криви граници характерни за карста. Така чрез създаване на блоков модел би могло да се покаже форма близка до реалната форма на карста. На фигурата (фиг. 21) е показана примерна схема, където черните точки са устията на сондажите, червените линии са тектонските нарушения, черните линии са контурите на истинските карстови форми, а зелените площи са резултатите от компютърната интерпретация на сондажните данни.



Фиг. 21. Примерна схема за моделиране на карстови форми чрез статистическа обработка на данни от сондиране. С червено са показани тектонски спрегнати нарушения, с черен контур – реалната форма на карстови образувания и със зелено – интерпретирани карстови форми, чрез статистическа обработка (IDW) на информация по сондажите отбелязани с черни точки.

За сондажите са използвани прости кодове – 1 сондаж преминаващ през карста и 0 за сондаж преминаващ през неокастрен участък. Метода на интерполиране между сондажите е „тежести обратнопропорционални на разстоянията“ и както се вижда той дава сравнително добри резултати. По голямата карстова форма (тази в ляво) е доста точно отчетена от статистиката, това е така, понеже в нея попадат по-голям брой сондажи, като освен това при проектиране на сондажната мрежа те са попаднали на много по-подходящи позиции спрямо тези оформящи дясната карстова форма. Това показва, че правилното определяне на предпочитаната геометрия на телата е важна и тя е неизбежна част от проучването независимо от типа находище и методите на геоложкото моделиране.

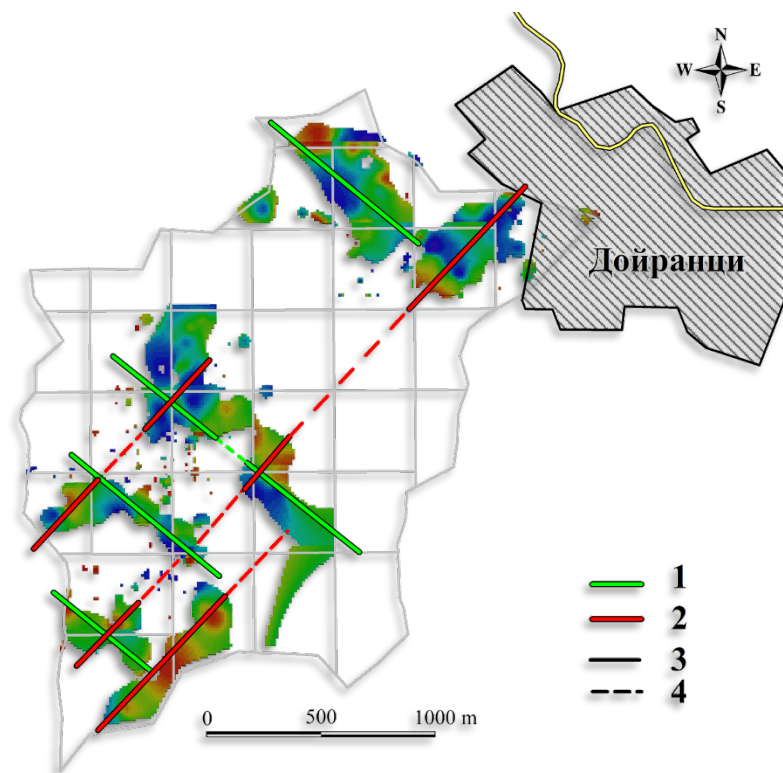
Пример: находище на каолин-кварцови пясъци „Саръгъл“

Представен е пример за извършване на анализ за определянето на геоложкия и геоморфоложкия контрол на карстови гнезда в находище на каолин-кварцови пясъци “Саръгъл” (Василева и Съчков, 2014).

Детайлен блоков модел е създаден по данни от около 1500 сондажа. Избраният размер на блоковете е $10 \times 10 \times 0,25$ m, което при площ от над $2,75 \text{ km}^2$ и дълбочина от над 100 m прави невъзможно моделирането със стандартен компютър. Поради това общият обем е разделен на 33 отделни блока (Василева и Съчков, 2014). Данните които са вкарани за всеки от отделните блокове са взети от доклада на Цонев (1972) за гнезда 15 и 16 на находище „Саръгьол“. За прокараните над 1500 сондажа са описани тяхното пространствено разпределение, просондирани литоложки разновидности и интервални проби за съдържания на Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 и др. Това прави общо над 3300 интервала.

Целта на блоковия модел е да се установят зони набогатени на желязни оксиди. При движението на флуиди в разломите се разтварят и преотлагат различни минерали. Това води до набогатяване или обедняване на дадени елементи (Кръстев и Кръстева, 2003). Карбонатните скали са първично бедни на желязо, ето защо зоните с аномално високи съдържания ясно показват движение на флуиди богати на желязни окиси. И тъй като те най-лесно преминават по разломи и свързани пукнатини, зоните набогатени на желязни окиси могат да се приемат и за зони на крехка деформация.

Крайната цел е да се филтрират и визуализират зоните с аномално високи замърсяванията, като при търсенето на тези зони не би следвало да се търсят абсолютни стойности на замърсяване, а драстични разлики спрямо средното ниво в единица обем. На фигура 22 се виждат примерни резултати от изготвените 33 отделни блока.



Фиг. 22. Интерпретирани разломи установени в гнезда 15 и 16 на находище „Саръгьол“ въз основа на набогатяването с Fe_2O_3 .

Основни посоки на разломните нарушения: 1. Посока NW-SE (128° - 130°); 2. Посока NE-SW (42° - 43°); 3. Нарушения доказани по интервали на опробване; 4. Интерполирани разломи.

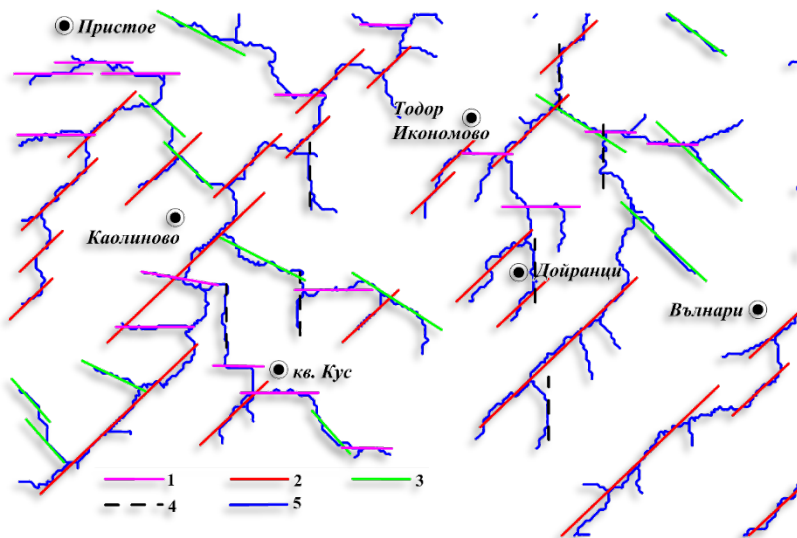
По-високите съдържания на Fe_2O_3 са показани с по-топли цветове, за всеки от 33те блока. Ето защо оцветените в червено стойности в някои блок не отговарят точно на останалите, като процентно съдържание.

Моделирането на находището е извършено в разширението към GIS продукта MapInfo – Encom Discover. Използвана е статистическа

обработка на сондажната информация по метода „Тежест обратнопропорционална на разстоянието“. Използвайки много малък размер на вокселите изграждащи модела и задавайки подходящи граници на влияние според гъстотата на сондажната мрежа получаваме ясно очертани зони на набогатяване с железни оксиди. Колкото по малки са призмите, толкова и зоните биха били по-тесни и следователно по-ясно отчетливи. По този начин освен за изчисляването на обеми от геоложки запаси, статистическата обработка ни дава и информация за предпочитаните ориентации на разпространение на пясъците, пряко зависеща от тектониката в региона.

Тъй като този анализ не може да се сметне за категорично точен сам по себе си, за конкретната задача за определяне на тектонския контрол при формиране на карст и свързаните с него находища са направени и някои други изследвания. Направена е литературна справка за вече определените тектонски направления – Въчев (1994), Малинова (1992), Малинова (1993), Филипов (1994а и б), Чешитев (1994), която показва, че макар и трудно различими под дебелия лъсови наслаги посоки на разпространение на разломите са определени от авторите и чрез похвати различни от предложени тук. Друг способ за доказване на точността на работата е направения на площ от 140 km² около гр. Каолиново линеаментен анализ (фиг. 23), за определяне на предпочитаната ориентация на тектонските нарушения.

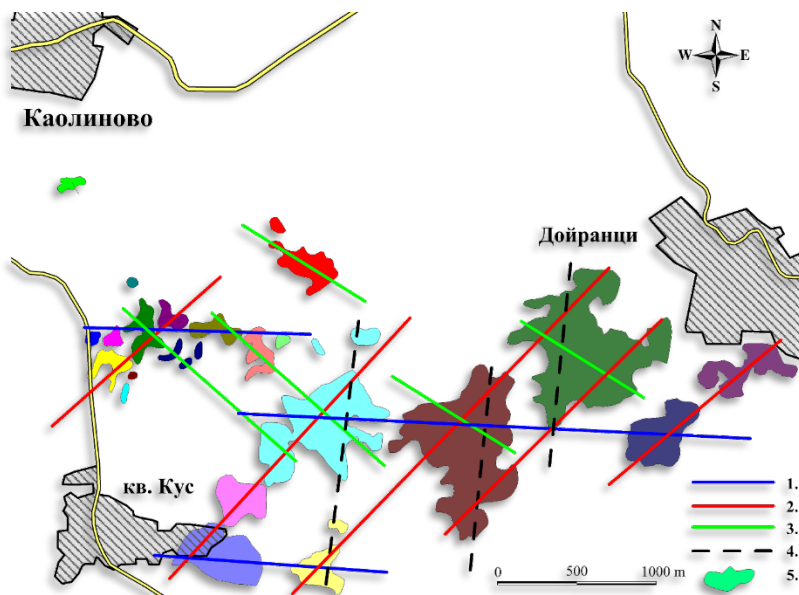
За направата на този анализ е използван софтуера MapInfo и по-конкретно функцията Extract Drainage Features на неговия модул Discover. Данни за топографията на терена са взети от радарна снимка SRTM с пределна разделителна способност 90 m. Макар и със сравнително ниска резолюция при зададена минимална площ за изчисляване 0,01 km², при анализ на данните от SRTM ясно се очертават линеаментни посоки идентични с тези от направения блоков модел (Фиг. 22) и данните от литературната справка.



Фиг. 23. Линеаментен анализ на хидрографските депресии. Основни посоки на тектонските нарушения: 1. E-W (90° - 92°) Сравнително слабо изразено; 2. NE-SW (46° - 48°) Най-силно изразено направление; 3. NW-SE (118° - 132°) Добре изразено направление; 4. N-S (0° - 2°) Слабо изразено; 5. Потоци (Streams) генерирани по данни от STRM, показващи основните посоки на линеаментите в района.

Чрез създадения блоков модел, използвайки статистическа обработка по метода „Тежест обратнопропорционална на разстоянието“ и съпоставените с него допълнителни данни (литературна справка и линеаментен анализ) е доказана предпочитаната ориентировка на тектонските нарушения. И тъй като карста се образува най-вече под действието на флуиди, които текат по свързани пукнатини то и неговата форма е в пряка зависимост от ориентацията и взаимоотношенията на различните тектонски деформации. По данни от докладите на Цонев (1969, 1971, 1972) е направена схема на формата на телата на проучваните гнезда от находище „Саръгьол“ (фиг. 24). На нея ясно се вижда, че формата на телата е в пряка зависимост от изчислените посредством изготвения блоков модел посоки на тектонските

пукнатини, както и някои по-слаби ориентации отразени в линеаментния анализ.



Фиг.24. Вероятна ориентация на тектонски нарушения, получени за всички гнезда на нах. „Сарбъл“.

Основни посоки на тектонски нарушения: 1. E-W (92° - 93°) Сравнително слабо изразено; 2. NE-SW (42° - 45°) Най-силно изразената посока; 3. NW-SE (127° - 130°) Добре изразена посока; 4. N-S (5°) Слабо изразено; 5. Генерализирана форма на гнездата и участъците от находище „Сарбъл“.

Разглежданите в тази част на работата похвати привидно не са в синхрон с предложените по-горе, базирани върху генериране на ограничителни повърхнини. Освен самото моделиране на обемни тела за изчисляване на геоложки запаси, важен етап от търсещо проучвателните дейности е и определянето на структурния контрол при

разпределението на дадената суровина. Чисто геометричното оконтуряване не е напълно приложимо, когато става дума за нелитифицирани полезни изкопаеми като каолин-кварцовите пясъци разгледани в тази глава или хидротермално контролираните находища, като например тези на хидротермално-метасоматични бентонити (Атанасов и Горанов в Трашлиев и др. 1988). Най-често тези суровини образуват лещовидни тела, моделирането на които с помощта на ограничителни повърхнини е описано по-горе, но тяхната форма и размери са най-вече обосновани от ориентацията и силата на тектонската деформация в района на изследване. Използването на чисто статистическа обработка за изчисляване на обема на геоложко тяло, без изясняване на структурните особености на терена и на самата суровина може да доведе до редица неточности. Тук на помощ идва компютърно геометрично моделиране, даващо възможност да се изясни структурния контрол на, а от там и границите на разпространение на суровината.

4.3. Нови програмни приложения за интегриране на геоложка информация в компютърните модели

Представените в тази работа формули за геометризацията на геоложки тела разместени по наклонена разломна плоскост и на геоложки гънки, изведени от метода на посочните косинуси (Ramsay, 2000) дават коректни резултати, но сами по себе си не са директно приложими за интегриране в GIS или CAD среда. За целите на този труд са създадени шаблони в Microsoft Excel (*.xltx), в които са разписани тези формули според алгоритъма на програмата. Целта е да се генерира база от точки, които да показват дадена плоскост или група от пресичащи се (косо разположени) плоскости. Изборът на Excel (фиг. 25) е породен неговата универсалност, т.е. експортираните от него точки могат лесно да се приложат на практика във всички GIS или CAD приложения, което избягва нуждата от използване на няколко различни програми езика, като Python (за ArcGIS продуктите и QGIS), AutoLISP (за Autodesk продуктите), MapBasic (за MapInfo), TLC (за GEOVIA продуктите) и т.н.

Въведи характеристика на основната точка:		Въведи характеристика на преместваните точки:	
№ първата точка	2	Втора точка	
Координати:		Допълнително разстояние OK	Допълнително OK
Координатна система и проекция	WGS'84		
Зона	34		
X (E)	650025,00		
Y (N)	4725935,00		
Z (H)	580,00	Трета точка	
Измерени структурни елементи:		Допълнително разстояние OK	Допълнително OK
СТРАНА	68		
НАКЛОН	30		
Изчисления по посока на затъване на пласта:			
Интервал м/у точките	10		
Брой точки +Z	5	Четвърта точка	
Брой точки -Z	22	Допълнително разстояние OK	Допълнително OK
Изчисления по посока на разпространението на пласта			
Интервал м/у точките	10		
Брой точки страна +90	5		
Брой точки страна - 90	5		
Стартирай трансформиране	Запиши в Ексел	Запиши TXT с точка	
		Запиши TXT със запетая	

Фиг. 25. Изглед на основния интерфейс на разработения в Excel шаблон за въвеждане на данни за изчисляване на плоскости за моделиране на разломи и гънки.

4.4. Примерни решения на конкретни геоложки задачи

Основната мотивация за създаването на този труд е работата ми по различни геоложки задачи. В периода 2008-2015 г. съм работил в различни задачи и находища, като например „Огняново – 1“ и „Огняново – 77“ (обл. Пазаджик), „Пуклина“ и „Балша“ (обл. София), „Гранитово“ (обл. Ямбол), „Бели пласт“ (обл. Кърджали), „Футула“ (обл. Бургас), „Магстрой“ (обл. Перник) и др.

В тази глава са разгледани примери за прилагане на разработените по-горе модели в реална геоложка ситуация. Използваната информация е от изпълнение на геоложки задачи в посочения период и включва преизчисляване на запасите по данни от стари проучвания и извършване на изцяло нови проучвателни програми в областта на индустриалните минерали и скали. Извършено е и сравнение на изчисленията спрямо по-стари доклади, като целта е да се очертаят разликите в обемите, получени от по-голямата степен на детайлност при компютърните методи на изчисляване на геоложки запаси. В някои от посочените случаи, поради напредналия добив и получените изцяло нови данни,

отговарящи на ситуацията в проучваната площ към момента на проучване, сравнението на получените обеми има за цел не да се съпоставят крайните обеми, а по-скоро разликата в процесите на получаването им.

Разгледани са общо четири различни обекта свързани с геометризация и изчисляване на обеми, като всеки обект е свързан и с няколко от разглежданите по-горе проблеми:

Първото разгледан обект е находище за скалооблицовъчни материали „Гранитово“ (Ямболска област). В отделните етапи на неговото проучване са разгледани проблеми свързани с:

- Геометризиране на тела при силно разчленен релеф;
- Използване на различен обем информация за отделните части на масива;
- Използване на разнотипна информация.

Второто разгледано находище е „Пуклина“ (Софийска област), което е за добив на химически чисти варовици за производство на вар. Целта на проучването е преизчисление на окачествяване на суровината (оценка на рандемана на находището), като по време на извършените проучвателни дейности бяха извършени следните процедури:

- Геометризирането на наклонени пластове;
- Геометризирането на карстови зони;
- Геометризиране на вертикални разломни зони.

Третият разгледан обект е находище на зеолити „Бели пласт (Кърджалийска област). Изборът му за представяне е обоснован от това, че чрез него се демонстрират решенията на следните проблеми:

- Точното отчитане на дебелината на покриващите наслаги;
- Отчитане на изклонването полезното изкопаемо и откривката;
- Възможностите за отчитане на тънки наслаги при рядка сондажна мрежа.

Чрез четвъртият избран обект – находище за калцитни мрамори за производство на вар „Огняново-77“ (Пазарджишка област) са разгледани проблемите свързани с:

- Моделиране на моноклинално затъване на пласт;
- Моделиране на вертикални разломни зони;
- Моделиране по теренни данни в помощ на проектирането на сондажната програма.

5. РЕЗУЛТАТИ

Работата по този труд може да се раздели на два основни етапа:

- Анализ на различни геоложки проблеми и съществуващите към момента методи за моделиране на тримерни тела и изчисляване на обеми;
- Представяне на нови възможни похвати за справяне с геоложки проблеми, за които към настоящият момент няма категорични решения.

В глава „Състояние на проблема“ са разгледани общо осем геоложки обстановки с характерни особености на моделирането. Те включват: силно разчленен терен; покрити ерозионни форми; частично и пълно изветряне на приповърхностните части на масивни скали; наличието на латерални прекъснатости на пластови скали; алтернация на пластове с различни физикомеханични и химични свойства и крехки и пластични деформации в скалите.

В същата глава са разгледани и седем „класически“ метода за изчисляване на геоложки запаси, чрез извършването на сравнително прости изчисления без помощта на компютър. За всеки един от методите са описани техните силни и слаби страни, както и възможността им за справяне с разгледаните проблеми при тримерното моделиране.

Направена е съпоставка проблем-решение (метод за решаване), резултатът от която показва, че независимо кой от разгледаните по-горе методи е избран за изчисляване на запаси от полезно изкопаемо, могат да се отчетат следните недостатъци:

- В разгледаните методи не е предвидена възможността за описване на тяло със стръмни граници;
- По своята същност методите не предполагат възможността за отчитане на формата на покриващите наслаги (откривката);

- Поради идеята, методите да са лесно достъпни за прилагане, нито един от тях не е създаден така, че графично да представя общия обем на геоложкото тяло;
- Сред разгледаните методи няма такива, които да работят при нагънато тяло;
- В анализирания метод не е заложена възможността за отчитане на крехките деформации в скалите, независимо дали става дума за размествания или обедняване по разломни зони.

Поради невъзможността за сложни моделирания по времето на създаването на разгледаните методи, не би могло да се очаква, че те биха могли да представят достатъчно точно геоложко тяло освен в идеализирани случаи, като напълно еднородно пластово или масивно тяло, върху което не са наложени никакви структурни деформации.

По тази причина в следващата глава – „Компютърни методи за изчисляване на обеми на сложни геоложки тела“ са разгледани най-често прилаганите „модерни“ методи за анализ на взаимоотношенията на обектите използвани за моделирането на обемни тела. Направен е анализ на възможността на тези методи за справяне с показаните проблеми, като и детайлно е разгледана същността на похватите, които се използват. Направена е ясна диференциация между методите базирани на статистическа или геометрична обработка на геоложката информация, като за всеки от методите са посочени силните и слабите му страни. Направена е съпоставка на похватите използващи обемни (Voxel) тела и тези изчисляващи обемите заключени между повърхнини.

В резултат от направените анализи може да се обобщи, че:

- Статистическата обработка на данните, като например методите „Кригинг“ и „Тежести, обратнопропорционални на разстоянието“ изисква множество еднотипни данни (напр. съдържанието на даден химически елемент), но в геоложката практика би следвало да се интегрира разнотипна геоложка информация: съдържание на даден компонент, границите на разпространение,

породени от структурни, литоложки, стратиграфски или геоморфоложки причини и др.;

- Към настоящия момент компютърното генериране на блокови модели разчита единствено на статистическата обработка на голямо количество информация, поради което използването им не е универсално приложимо;

- Моделирането на геоложки тела заключени между сложни, компютърно генерирани повърхнини дава възможност за използване както на статистическа, така и на чисто геометрична обработка на наличната информация. Нещо повече, при геометричното моделиране се допуска използването на значително по-малък обем еднотипни данни, за сметка на възможността за интегриране на различна по своята структура и тип информация, което предполага по-голяма свобода при определяне формата на моделираните тела.

В специалната част на дисертационния труд (глава 5) е предложена нова методика за решаване на геоложки задачи, в които при използване на съществуващите към момента методи не се получават достоверни резултати за интерпретацията и моделирането на геоложката обстановка. Методът на ограничителните повърхнини (Съчков и Димитров, 2012) е разновидност на подхода за изчисляване на обеми, заключени между сложни тримерни векторни повърхнини. Този метод анализира разнородна по произход и количество геоложка, геоморфоложка и др. информация, като по този начин се отделя по-голямо внимание на субективната геоложка преценка, отколкото на чисто математическата обработка на събраната база данни.

Предложени са решения на конкретни геоложки проблеми, разгледани в глава „Състояние на проблема“. Основно внимание е обърнато на моделирането на гънки и размествания по разломи (Съчков, 2015), където е адаптиран методът на посочните косинуси (Ramsay, 2000). Освен създаденият теоретичен подход за моделирането на разломи и гънки, неговата приложимост е обезпечена и чрез създаване на изцяло нови софтуерни приложения. Описаните в глава 5.3.

приложения са разработени в MS Excel среда и създават база данни която лесно може да бъде интегрирана на практика във всички GIS и CAD продукти, като по този начин допълва тяхната функционалност, що се отнася до геоложкото моделиране.

Специално внимание е обърнато и на моделирането на лещовидни тела. Съпоставяйки познатите към момента метод на ограничената екстраполация и методите на интерполация и екстраполация, представени от Попов и Бакърджиев (1985), е развит нов подход даващ възможност за полуавтоматизирано изчисляване и интегриране в GIS или CAD среда на положението на триизмерния контур на лещовидните тела. Новото при него е използването на повече от две съседни проучвателни изработки и анализ и моделиране на вероятната кота на изкливане на тялото.

Представени са решения също и на други често срещани геоложки проблеми при геометризиранието на: тела при силно разчленен терен; недеформирани слоести тела; тела разместени по вертикални разломни плоскости; обедняване на масива от разломни и карстови зони.

Разработените теоретични решения на геоложки проблеми при моделирането на обемни тела са представени и в контекста на реални геоложки проучвания (глава 5.4.). Разгледани са четири отделни обекта и за всеки от тях са описани стъпките на моделиране чрез интегриране на предложените в този труд похвати. Всеки обект сам по себе си съдържа повече от един от посочените проблеми при моделирането и изисква решение представляващо съвкупност от няколко от представените възможности за решение на отделни геоложки ситуации. По този начин са демонстрирани възможностите на геометризиранието геоложка информация с помощта на GIS и CAD софтуер.

В заключение, основните резултати могат да се резюмират по следния начин:

- Разгледаните „класически“ методи за изчисляване на геоложки запаси, във времената на компютърните технологии са неприложими, но са използвани като основа за разработване на нови модерни методи на работа;

- Статистическите похвати, често пъти не дават задоволителни резултати, поради което е вниманието е съсредоточено върху други възможни техники (структурно-стратиграфски) за тримерно моделиране;
- Предложените тук геометрични решения дават добри резултати в много от случаите когато статистиката е безсилна;
- Разработената методика дава решението на различни геоложки обстановки, но не може да даде универсално решение. Често пъти геометричното моделиране се нуждае и от статистическа обработка, както и обратното. Ето защо може да се каже, че похватите разработени в този труд, могат да бъдат разглеждани най-вече като обогатяване на възможностите в геоложката практика, а не като еднозначно решение на всички проблеми.

6. ОСНОВНИ ПРИНОСИ

Този труд е разработен в контекстна на специалност „Методи и техника на геоложките изследвания“.

Тъй като в практиката е целесъобразно моделирането на геоложките граници да се изследва геометрично преди да се пристъпи към прилагане на статистическа обработка, предложените методи са разработени на геометрична основа. В тази насока са и основните приноси на работата.

- Разработена е нова методика базирана на метода на посочните косинуси, позволяваща компютърното моделиране на геоложки тела разместени по разломни плоскости, върху нова математическа основа използваща познати геоложки и геодезически принципи;
- Разработена е и методика за компютърно моделиране на гънки, базирана също на метода на посочните косинуси;

- Разработени са софтуерни приложения за интегрирането на методиките за моделиране на разломни нарушения и гънки в GIS и CAD среда;

- Представено е ново решение за предвиждане на границите на разпространение на лещовидни тела, различна от съществуващите с това, че позволява автоматизирано и полуавтоматизирано анализиране на повече от една проучвателна изработка. Това дава възможност за по-прецизното проектиране, не само на латералните граници на телата, но и за анализиране на вертикалното им положение в масива. Тук отново е разработен изцяло нов математически апарат, стъпващ на познати геоложки и геометрични закономерности;

- Предложен е нов подход за съвместно използване на популярните методи за статистически анализ и моделиране с разглежданите тук геометрични решения. Този подход е еднакво приложим както при търсещо-проучвателните дейности, така и при чисто научни изследвания на даден район;

Всички разработени методически решения са обобщени в „Метод на ограничителните повърхнини“, като по този начин е създадена една завършена, нова за геологията методология за моделиране на сложни тела и изчисляването на техните обеми. Разликата със съществуващите към момента методи е в това, че тук е съчетано моделиране по метода на триангулацията (изграждането на TIN модели), с интегрирането на геоложките ограничения на обекта на моделиране.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Написването на този труд е мотивирано от личното ми наблюдение при реални геоложки проучвания, показващо сериозната нужда от развиване на възможностите за интегриране на субективната геоложка преценка при моделирането на геоложки тела и изчисляването на техните обеми. Това е мултидисциплинарно изследване, което в контекста на специалността „Методи и техника на геоложките изследвания“ разглежда възможностите за нова методика. Целта е да се обогатят възможностите за решаване на различни геоложки проблеми

на моделирането, като наравно с утвърдените вече методи се предлага нова методика приложима в GIS и CAD среда.

За постигане на тази цел е направен анализ на наложените се в практиката методи, като са отчетени техните силни и слаби страни.

Повечето методи за изчисляване на запасите не са достатъчно достоверни при проучванията със сравнително рядка сондажна мрежа. Тава е ясно забележимо при нискобюджетните проучвания на индустриални минерали и скали, както и при някои инженерно-геоложки проучвания. Предложената тук методика е съсредоточена именно за решаване проблемите в тази област, където съществуващите похвати не дават достатъчно добри резултати. Представените решения са базирани на геометричната обработка на разнотипната геоложка информация, която може да се събере на терена.

Представените решения включват моделирането на гънки и разломи, интерполирането на изклинващи пластове и лещи, обединяването на масива от широки разломни зони и др. Разбира се те не покриват всички геоложки проблеми срещани при моделирането на обемни тела и не могат да се считат за универсални, но за такива не могат да се считат и всички останали познати методи. Единствено тяхното комбиниране и бъдещето им развитие би могло да бъде вярното решение в стремежа към обективна оценка на геоложките запаси от полезни изкопаеми.

8. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Василева, К., Д. Съчков. 2014. Методи за определяне на геоложкия и геоморфоложкия контрол на разпространението на каолинова суровина на примера на находище “Саръгьол” – Североизточна България. – В: *Сб. разширени резюмета „Геонауки 2014”*, Бълг. геол. д-во, 79-80.

Съчков, Д., Ив. Димитров. 2012. „Метод на ограничителните повърхнини“ – възможности за компютърно моделиране при

изчисляването на запаси от индустриални минерали и скали. – *Год. МГУ*, 55, Св. I – Геол. и геофиз., 69-74.

Съчков, Д., Ив. Димитров. 2013. Методика за генериране на ограничителни повърхнини по структурни измервания за компютърно изчисляване обемите на геоложки тела. - В: *Сб. разширени резюмета „Геонауки 2013“*, Бълг. геол. д-во, 105-106.

Съчков, Д. 2015. Геометрично моделиране на тектонски нарушения в ГИС среда по данни от теренни геоложки изследвания, като възможност за оптимизация на проучването. – *Сп. Бълг. геол. д-во*, 76, 2-3, 5-17.

9. ИЗПОЛЗВАНА В АВТОРЕФЕРАТА ЛИТЕРАТУРА

Бакърджиев, С., Д. Въндев. 2006. *Основи на геостатистиката*. София, Издателска къща „Св. Иван Рилски“, 97 с.

Василева, К., Д. Съчков. 2014. Методи за определяне на геоложкия и геоморфоложкия контрол на разпространението на каолинова суровина на примера на находище “Саръгьол” – Североизточна България. – В: *Сб. разширени резюмета „Геонауки 2014“*, Бълг. геол. д-во, 79-80.

Въчев, В. 1994. *Тектонска напуканост на седиментните скали в предбългарина*. София, Академ. издат. „Мартин Дринов“, 288 с.

Кръстев, Т., Кръстева, Т., 2003. *Палеокарстът и каолиновите находища в Североизточна България*. София, Фондация център по карстология „Владимир Попов“, 239 с.

Малинова, В., и др., 1992. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100 000. Картен лист Провадия*. София, Печ. на изд. на БАН, 54 с.

Малинова, В., и др., 1993. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100 000. Картен лист Нови пазар*. София, Печ. „Болит“, 30 с.

Пеевски, В., В. Тенев, С. Атанасов, 1975. *Геодезия*. София, ДП „В. Александров“, 329 с.

Попов, П., С. Бакърджиев, 1985. *Търсене и проучване на полезни изкопаеми*. София, ДИ „Техника“, 180 с.

- Съчков, Д., Ив. Димитров, 2012. „Метод на ограничителните повърхнини“ – възможности за компютърно моделиране при изчисляването на запаси от индустриални минерали и скали. – В: *Годишник на МГУ*, Том 55, Св. I, Геология и геофизика, 69-74
- Съчков, Д., Ив. Димитров, 2013. Методика за генериране на ограничителни повърхнини по структурни измервания за компютърно изчисляване обемите на геоложки тела. - В: *Сб. разширени резюмета „Геонауки 2013“*, Бълг. геол. д-во, 105-106.
- Съчков, Д., 2015, Геометрично моделиране на тектонски нарушения в ГИС среда по данни от теренни геоложки изследвания, като възможност за оптимизация на проучването. – В: *Сп. на Бълг. геол. д-во, Бр. 76, кн. 2-3*, 5-17.
- Трашлиев, С., М. Андреевич, Г. Атанасов, О. Георгиева, А. Григоров, Е. Джурова, Т. Кунчева, И. Начев, С. Попов, Б. Стоянов, Г. Чаталов, 1988. *Неметални полезни изкопаеми в България*. София, ДИ „Техника“, 268 с.
- Ушаков, И., 1962. *Горная геометрия*. Москва, Государственное наоучно-техническое издательство литературы по горному делу, 459 с.
- Филипов, Л., и др. 1994а. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100 000. Картен лист Разград*. София, Печ. „Болд“, 46 с.
- Филипов, Л., и др. 1994б. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100 000. Картен лист Дулово*. София, Печ. „Болд“, 42 с.
- Христов, И., 1974. *Минна геометрия*. София, ДИ Техника, 380 с.
- Чешитев, Г., и др. 1994. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100 000. Картен лист Добрич*. София, Печ. „Болд“, 47 с.
- Bratt, S., B. Booth, 2004. *Using ArcGIS 3D Analyst*. Redlands, California: ESRI, 382 p.
- Goodchild, M., K. Kemp 1990. NCGIA Core Curriculum in GIS, UNIT 39 The TIN model. – In: <http://ibis.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/toc.html#UNIT39>

- Heywood, I., S. Cornelius, S. Carver, 2002. *An Introduction to Geographic Information Systems*. Essex, England: Prentice-Hall, Inc. Imprint of Pearson Education, 59-63, 128-130 pp.
- Longley, P., M. Goodchild, D. Maguire, D. Rhind, 2005. *Geographic Information Systems and Science – Principles, Techniques, Management, and Applications*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd, 76-77, 189-190, 333-337 pp.
- Price, M. 2014. Creating faulted geologic surfaces with ArcGIS. – In: *ArcUser*, Summer 2014, 48-54
- Ramsay, J., 1967. *Folding Fracturing of Rocks*. New York, McGraw-Hill Ins., 568 p.
- Ramsay, J., R. Lisle, 2000. *The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 3. Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology*. London, Academic Press, 701-1061 p.
- Ragan, D., 2009. *Structural geology. An introduction to geometrical techniques*. Cambridge, Cambridge University Press, 602 p.
- Watson, D., G. Philip, 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. – In: *Geo-Processing*, 2, 315- 327

Фондови материали:

- Цонев, В. 1972. Доклад за детайлното проучване на каолинова суровина на нах. Саръгьол - гнезда №№15 и 16 в района на с. Каолиново, шуменски окр., през 1961-72г. С изчисление на запасите към 01.01.74 г. НГФ – ДСО-ГП
- Цонев, В. 1971. Доклад за резултатите от детайлното проучване на каолинова суровина на нах.Саръгьол - гнезда - 14, 17, и 20 в района на с. Каолиново, Шуменско през 1961-71 г. с изчисление на запасите към 01.01.72 г. НГФ – ГПП-ЯБ.
- Цонев, В. 1969. Доклад за резултатите от детайлните проучвания на каолинова суровина на находище Саръгьол, гнезда №№ 21 и 22, Шуменски окр., през 19 61-77 г. с изчисление на запасите към 01.01.79 г. НГФ – ГПП-ЯБ.