

ОЙЛЕРОВА ДЕКОНВОЛЮЦИЯ НА МАГНИТНИТЕ АНОМАЛИИ НАД БАЗАЛТОВИТЕ ТЕЛА В СЕВЕРНА БЪЛГАРИЯ

Петър Ставрев¹, Даниела Геровска², Маркос Араузо-Браво³

¹ Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, София 1700, stavrev@mgu.bg

² Университет Кюшу, Фукуока 812-8581, Япония, daniela@mine.kyushu-u.ac.jp

³ Университет Бургос, Бургос 09006, Испания, marara@dali.eis.uva.es

РЕЗЮМЕ

Извършена е Ойлерова деконволюция на магнитните аномалии над базалтови тела по линията Сухиндол – Свищов в Северна България. Приложени са оригинални алгоритми и програми за 3D Ойлерова деконволюция с използване на диференциални подобни преобразования на магнитното поле. Това позволява съвместно определяне на координатите на особените точки на полето и на структурния индекс, без да са нужни входни данни за вектора на намагнитеността и формата на смутителите. Така са получени оценки за дълбочинния обхват и главните черти в морфологията на редица базалтови тела по линията на палеовулканските центрове и тяхната периферия. Преобладават стълбовидни по форма тела (некове) на юг и лещовидни тела на север и по периферията. В дълбочина масивните тела достигат от стотици метри до два километра.

ВЪВЕДЕНИЕ

Базалтовите тела по линията Сухиндол – Свищов са единствена проява на вулканска дейност с разкритие на повърхността за типично платформената обстановка в Централна Северна България. Интересът към тези образувания се подхранва както от информацията, която те носят за геоложкия строеж и развитие на Мизийската платформа в нейната южна част, така и от възможността да се добива от тях ценен строителен материал.

Наличието на редица естествени разкрития на базалтите и на кариери за техния добив е позволило да се извършат сравнително пълни изследвания на геоложката им характеристика и на физичните им свойства. Сведения за положение, минерален състав, химизъм, магнитни свойства и палеомагнетизъм на базалтите намираме в трудовете на Г. Бончев 1904, Mavrudchiev *et al.* 1971, Йовчев *и др.* 1971, Nozarov *et al.* 1981, Богданов *и др.* 1983. За дълбочинното разпространение на базалтовите тела обаче данните са оскъдни, а малкото известни оценки от доклади и публикации са с качествен характер, (Nozarov *et al.* 1981).

В тази статия се представят резултати от прилагането на един пряк метод за интерпретация на магнитни аномалии с възможност да се получат числени оценки за дълбочината и формата на базалтовите тела без необходимост от задаване на техен геометричен и магнитен модел и привличане на данни за големината и посоката на вектора на намагнитеност.

ГЕОЛОЖКИ И ГЕОФИЗИЧНИ ДАННИ

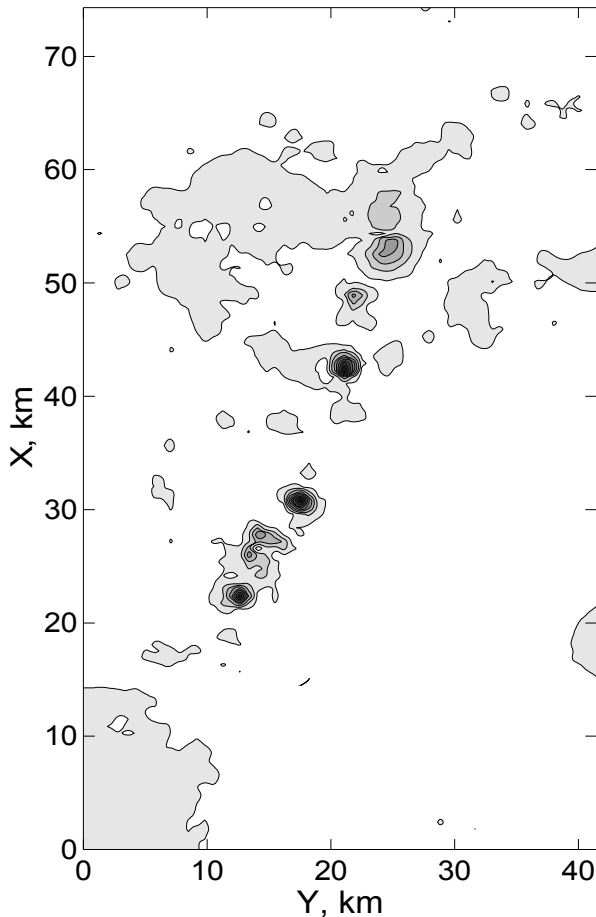
Между градовете Сухиндол и Свищов по линия с азимут 16° и дължина 35 km се разполагат 15 отделни разкрития

на базалтови тела. Те са с размери от 200 m до 1 km, като на места образуват възвишения. Базалтите са тъмни и плътни с оливиново-пироксенов състав от натриево-алкален тип на базалт-базанитовата формация (Mavrudchiev *et al.* 1971, Богданов *и др.* 1983). Сравнително голямо, 6% до 10 %, е съдържанието на феромагнитни съставки, представени главно от титаномагнетит (Nozarov *et al.* 1981). Подреждането на множеството разкрития по една линия се тълкува като проява на крипторазлом по който е прониквал магмения материал (Mavrudchiev *et al.* 1971, Йовчев *и др.* 1971). Застиналите образувания са от субвулкански тип, некове, рядко дайки.

Магнитните и палеомагнитни характеристики са изучени по множество ориентирани образци взети от естествените и изкуствени разкрития на базалтови тела (Nozarov *et al.* 1981). Магнитната възприемчивост се мени от 0.016 SI до 0.046 SI, което определя сравнително висока индуктивна намагнитеност. Естествената остатъчна намагнитеност преобладава с коефициент на Кьонигсбергер между 2 и 26. Намагнитеността има нормална насоченост, но за три от разкритията в южната част е установена обратна остатъчна намагнитеност. Съотношенията между индуктивна и остатъчна намагнитеност създават разнообразие в посоките на ефективната намагнитеност. По палеомагнитни данни възрастта на базалтовите продукти се оценява на плио-плеистоценска, а дълбочината на магмените камери – на 50 km.

Контрастът в магнитните свойства на базалтите спрямо вместващите ги немагнитни седименти (песъкливи и глинести льосове, мергели и варовици) обуславя една интензивна проява на базалтовите тела в магнитното поле. Магнитните аномалии в района са измервани при средномащабна снимка на вертикалната съставяща Z. Тук те са представени с изчисления модул T_a на аномалния магнитен вектор (Фиг. 1). Както се вижда, интензивните

аномалии с амплитуда над 100 nT се разполагат над и в близост на базалтовите разкрития. Очертанията на изолиниите са изометрични с най-високи достигани стойности при разкритията в местностите Варча, Бутово-юг и Червена. Със средна интензивност на максимумите между 100 nT и 250 nT са аномалиите от същата верига при Овча могила, Върбовка, Ташладжик и Черна могила.



Фигура 1. Карта на модул T_a , nT, на аномалния магнитен вектор, изчислен от измерената компонента Z .

Около тези разкрития, на разстояние до 15-20 km, се наблюдават множество слабо интензивни магнитни аномалии с екстремуми под 100 nT. Техните източници вероятно са покрити остатъци от ареала на разлив на нисковискозните базалтови лави. Магнитните аномалии отразяват сумарен ефект от магнитните тела. В сравнение с разкритията на тези тела магнитните аномалии T_a със своя максимум и конфигурация дават повече информация за разположението и формата на масивното магмено тяло в план и дълбочина. За извличане на такава информация се поставят и решават обратни магнитни задачи (вж Димитров и Ставрев, 1986). Техните решения определят геометричните и магнитни параметри на източника на магнитната аномалия.

МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Според степента на изученост на аномалното поле и неговите източници в разглеждания район подходящо е

използването на преки методи за решаване на обратни задачи. Един от ефективните методи със широко приложение е този на Ойлерова деконволюция в 2D и 3D задачи. Наименованието е дадено от Reid *et al.* (1990), но подходът е известен още от статията на Соловев (1960) и развит независимо за 2D задачи от Thompson (1982).

За източници на магнитно поле A с една особена точка $M(x_0, y_0, z_0)$ в присъствие на постоянен фон B е валидно уравнението на Ойлер за еднородни функции:

$$(x - x_0) \frac{\partial A}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial A}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial A}{\partial z} = N(B - A), \quad (1)$$

където: (x, y, z) са координатите на наблюдателната точка, $N = -n$, където n е степен на еднородност, а N е коефициент наречен структурен индекс (Thompson 1982). Структурният индекс зависи от геометрията на източника. За точков и хомогенен сферичен източник $N = 3$, за линеен източник (линия диполи или полюси и хомогенен цилиндър, стълб, тръба и др.) $N = 2$, за повърхнинен източник (тънък пласт, дайка и др.) $N = 1$, за контакт, върхова точка на блок и пирамида с голямо разпространение в дълбочина $N = 0$.

Задачата се решава като се съставя преопределена система от линейни уравнения (1) при зададена стойност на N и се определят по метода на най-малките квадрати координатите (x_0, y_0, z_0) . Чрез изпитания на различни стойности N се намира решение с най-малък стандарт, който следва да е под зададена стойност, примерно под 15% до 25% от намерената дълбочина на източника по z_0 (Reid *et al.* 1990). Параметър на тази операция по решаване на обратната магнитна задача е също размерът на прозореца и съответния брой вътрешни наблюдателни точки по които се съставя системата линейни уравнения, вземайки данните от една карта или профил.

Тук прилагаме едно развитие на метода Ойлерова деконволюция, което позволява линеаризиране на системата уравнения при участието на N като неизвестна величина и в присъствието както на постоянен, така и на линейно изменящ се фон (Stavrev 1997). Задачата се решава с използването на диференциални подобни преобразования (ДПП) на компонента $A(x, y, z)$ на аномалния магнитен интензитет. ДПП са функции от вида (Ставрев 1981)

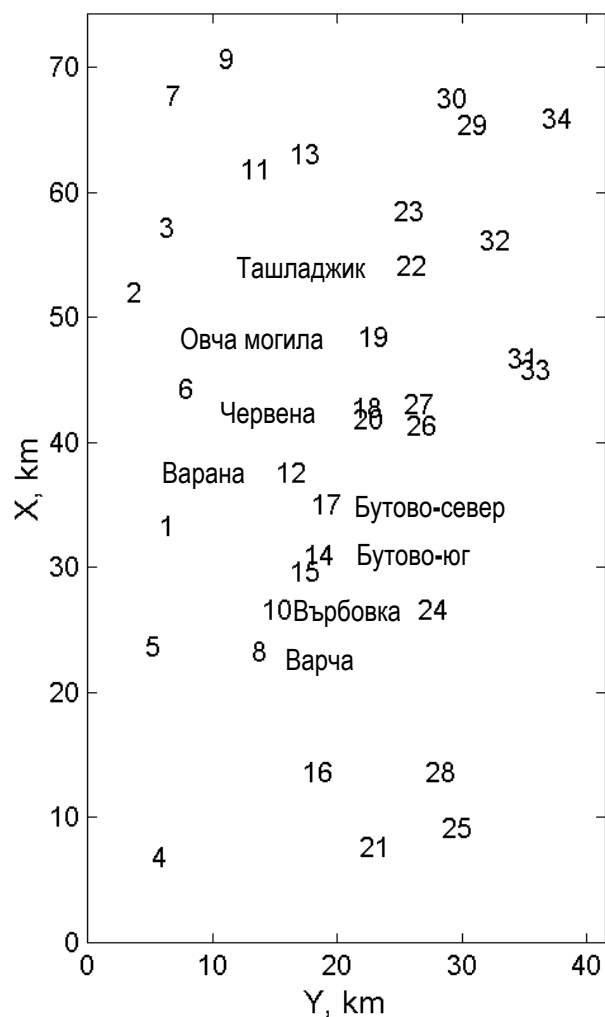
$$S[A] = (u - 3)A + (a - x) \frac{\partial A}{\partial x} + (b - x) \frac{\partial A}{\partial y} + (c - z) \frac{\partial A}{\partial z}, \quad (2)$$

където: u е параметър със стойности от 0 до 3, така че $(u - 3) = -N$ в ур.(1); (a, b, c) са координатите на една коя да е точка C , избрана за център на геометрично подобие. Ако центърът на подобие $C(a, b, c)$ съвпадне с особената точка $M(x_0, y_0, z_0)$, то $S[A] = 0$ във всички наблюдателни точки. В присъствие на линеен фон Φ се получава линейна функция $S[A + \Phi] = S[A] + S[\Phi]$, тъй като Φ има постоянни производни в ур.(2).

Въз основа на тези свойства задачата се свежда до получаване на линейно разпределение на ДПП на наблюдаваното поле $F = A + \Phi$. За целта се минимизира

остатъчната дисперсия на линейната регресия на данните за F .

Действията се извършват в рамките на задаван прозорец по мрежата данни на карта или профил. Качеството на

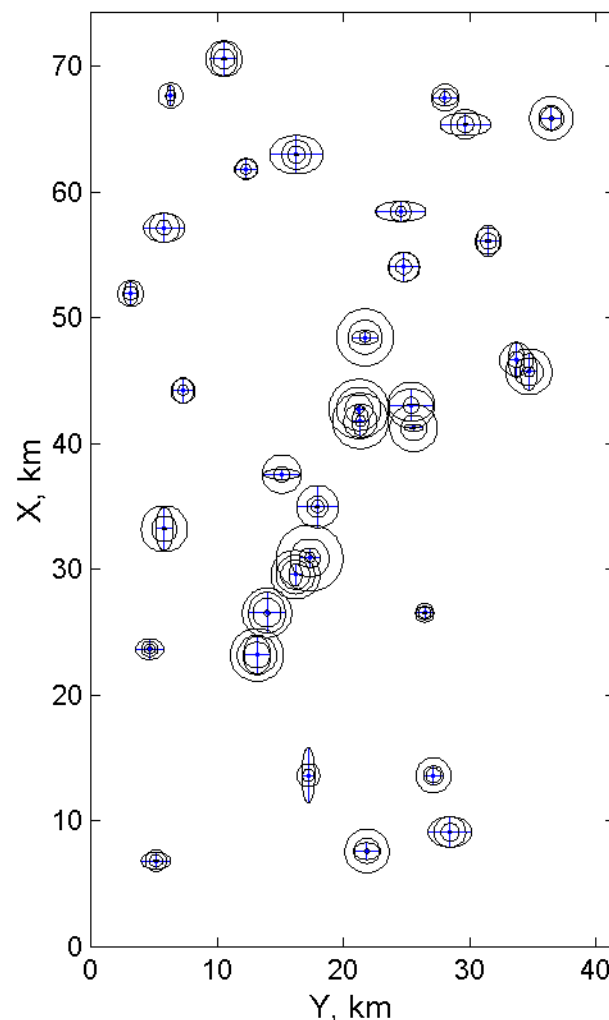


Фигура 2.. Индекси на формираните кластери от решенията на Ойлеровата деконволюция, съответстващи на базалтовите тела по линията Сухиндол-Свищов. Индексите съвпадат с тези от Таблица 1, където са представени статистическите характеристики на кластерите.

резултата за неизвестните x_0 , y_0 , z_0 и N се оценява по два критерия: (а) относителния стандарт (както по-горе) и (б) стойността на N , която следва да попада в диапазона между 0 и 3 при стандарт под задавана величина, свързана с желаната степен на приближение (Stavrev 1997).

Осъществяването на този подход извършваме с разработената от Gerovska and Araúzo-Bravo (2003) компютърна програма за Ойлерова деконволюция с непредписан структурен индекс. По зададената мрежа данни се образуват прозорци с даден размер около всяка точка на мрежата. Центърът на прозореца се премества последователно от точка в точка по редове и стълбове.

Така се реализира схемата на плъзгащи се и прекриващи се прозорци. Получаваните приемливи резултати за x_0 , y_0 , z_0 и N по множества от съседни прозорци се обработват статистически. Образуват се групи резултати отнасяни към един отделен източник с определяне на средната стойност и доверителния интервал за всеки търсен параметър.



Фигура 3. Изглед в план на центъра на тежестта на получените в резултат на Ойлеровата деконволюция кластери на решенията, с интервали на доверие, изобразени като концентрични кръгове за дълбочината, и овали на доверие за хоризонталните координати.

РЕЗУЛТАТИ

Извършена е 3-мерна Ойлерова деконволюция на аномалното магнитно поле на площ от 3000 km² (Фиг. 1) над разкриващи се и вероятно покрити базалтови тела около линията Сухиндол-Свищов. Според ширината на аномалните прояви и първите оценки за дълбочините на вътрешни точки на телата полуразмерът на прозореца е взет 3.2 km. Така в един прозорец попадат 121 точки от мрежата данни, по които се извежда решение за 4-те неизвестни x_0 , y_0 , z_0 и N .

На Фигура 2, в плана на магнитната карта, са дадени номерата на отделените 34 групи резултати за източниците на магнитни аномалии с различна интензивност.

Хоризонталното положение и дълбочините с техните овали на доверие са показани графично на Фигура 3 и числено в Таблица 1. Анализът на получените резултати ни дава възможност да интерпретираме картината на ано малното магнитно поле очертавайки следните по-характерни положения.

Таблица 1. Оценки за координатите на особените точки и структурните индекси, съвместно с интервалите на доверие, на базалтовите тела по линията Сухиндол-Свищов. Оценките са за прозорец с размер of 11×11 мрежови точки за нивото на земната повърхност. Интервалите на доверие са изчислени за вероятност 95% решенията да попадат в съответния интервал.

Индекс	Брой решения	x_0, km	y_0, km	z_0, km	N
1	42	33.24±1.67	5.81±0.68	0.50±0.41	0.56±0.68
2	11	51.95±0.88	3.13±0.57	0.27±0.23	0.60±0.63
3	59	57.17±1.13	5.78±1.60	0.29±0.30	0.61±0.70
4	6	6.84±0.66	5.15±1.16	0.26±0.16	0.22±0.37
5	11	23.66±0.80	4.65±1.09	0.21±0.09	0.19±0.27
6	48	44.21±1.02	7.29±0.85	0.20±0.27	0.38±0.75
7	5	67.68±0.78	6.30±0.29	0.21±0.27	0.41±0.52
8	76	23.21±1.46	13.14±1.09	0.78±0.26	2.40±1.11
9	8	70.60±1.34	10.53±1.08	0.40±0.30	0.84±0.86
10	44	26.56±1.61	13.94±1.45	0.56±0.42	1.87±1.34
11	8	61.84±0.75	12.30±0.92	0.20±0.22	0.56±0.78
12	17	37.58±0.41	15.11±1.42	0.31±0.45	0.85±1.17
13	77	62.99±1.51	16.27±2.08	0.33±0.24	0.83±0.83
14	68	30.91±0.78	17.32±0.82	0.76±0.55	2.21±1.76
15	20	29.60±0.87	16.19±0.50	0.77±0.19	2.50±0.39
16	11	13.65±2.17	17.21±0.51	0.23±0.22	0.44±0.86
17	16	35.00±1.67	17.94±1.63	0.25±0.17	0.56±0.71
18	14	42.77±0.41	21.20±0.36	0.86±0.32	2.42±1.03
19	39	48.45±0.55	21.70±1.03	0.67±0.45	1.99±1.52
20	15	41.82±1.17	21.33±0.64	0.65±0.44	1.56±2.31
21	10	7.61±0.66	21.85±1.04	0.49±0.38	0.93±0.96
22	89	54.05±1.14	24.78±1.24	0.31±0.27	0.66±0.71
23	7	58.47±0.78	24.53±1.96	0.19±0.21	0.30±0.66
24	6	26.55±0.52	26.42±0.64	0.23±0.13	0.34±0.44
25	62	9.13±1.18	28.43±1.70	0.34±0.27	0.74±0.83
26	5	41.27±0.26	25.54±0.74	0.50±0.44	0.39±1.05
27	8	43.07±1.26	25.35±1.75	0.32±0.59	0.61±0.78
28	6	13.64±0.73	27.12±0.79	0.28±0.40	0.57±0.87
29	31	65.39±0.88	29.65±1.99	0.33±0.26	0.84±0.61
30	8	67.52±0.68	28.05±0.94	0.22±0.31	0.73±0.83
31	33	46.68±1.39	33.68±0.61	0.33±0.33	0.69±0.83
32	30	56.11±1.23	31.46±0.90	0.30±0.21	0.63±0.62
33	54	45.73±1.43	34.68±0.67	0.55±0.35	1.12±0.65
34	37	65.87±0.91	36.45±0.81	0.49±0.37	1.37±1.03

Силно интензивните магнитни аномалии при Варча, с номер 8 на Фиг. 2, при Бутово-юг с номера 14-15, и при Червена с номера 18 и 20, имат близки показания за дълбочината z_0 и структурния индекс N . Дълбочината до особената вътрешна точка на телата е в интервала между 650 m и 860 m, средно 760 m, а структурния индекс N е между 1.56 и 2.51, средно 2.22. Последното говори за уширена стълбовидна форма на базалтовите тела, най-вероятно некове. Според конфигурацията и интензивността на аномалиите това са вертикални и субвертикални

масивни тела с дълбочина до основанието поне два пъти z_0 , т.е. най-малко 1.5 km.

Аномалиите със средна интензивност се разделят на две групи по характера на резултатите от Ойлеровата деконволюция. В първата група влизат аномалиите при Върбовка, с номер 10, и при Овча могила, с номер 19. Дълбочината z_0 е съответно 570 m и 670 m, а структурният индекс - 1.87 и 1.99. Както се вижда, телата може да приемем за стълбовидни по форма. Параметрите им са близки до тези на описаните по-горе за интензивните аномалии, но телата

са с по-малка маса или по-малко източване в дълбочина. Втората група резултати се отнасят за телата при Ташладжик (номер 22) и при Черна могила (номер 23). Тук дълбочините z_0 са значително по-малки – 310 m и 200 m съответно, а структурният индекс по-нисък - 0.66 и 0.30 съответно. Такива индекси са характерни за тънки пластове и дайки ($N = 1$) или за по-дебели пластовидни тела, покрови и контакти с горни ръбови точки близо до земната повърхност ($N = 0$). За междинни стойности формата на телата може да се оцени като лещообразна или паралелепипедна с различна дебелина. В разглежданите случаи има вероятно запазен материал в кратерите на двата близки палеовулкана в северната част на линията Сухиндол-Свищов.

За периферията на веригата разкрити базалтови тела, където се наблюдават нискоинтензивни магнитни аномалии, резултатите сочат без изключение сравнително малки дълбочини z_0 и ниски стойности на структурния индекс N . От набелязаните 20 аномалии (Фигури 2, 3 и Таблица 1) са получени дълбочини в интервала 200 - 500 m, средно 320 m, и структурни индекси от 0.19 до 1.12, средно 0.64. Тези резултати можем да тълкуваме като отразяващи наличието на тънки или удебелени покрити останки от лавови разливи, запълнили по-дълбоките форми на палеорелефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от извършената интерпретация на аномалното магнитно поле в района на линията Сухиндол-Свищов с прилагане на метода на Ойлерова деконволюция без предписан структурен индекс показват реално възможностите за оценка на дълбочини и форма на смущаващите тела при минимум допълнителна информация за геометрия и намагнитеност на телата. Получените резултати се съгласуват с геоложките представи за некообразни базалтови тела в гърлата на палеовулканите. Заедно с това по магнитни данни се набелязват и тела от разлив на базалтови лави.

Направените оценки за дълбочина и форма могат да послужат ефективно като приближения към построяването

на магнитни модели на базалтовите тела в изследвания район. За целта е нужно да се проведат по-детайлни и точни магнитни снимки над и около разкритията на представляващите интерес тела.

ЛИТЕРАТУРА

- Богданов, Б. (гл. ред.) и др., 1983. Магматизм и металлогения Карпато-Балканской области. Изд. БАН, София, 300 с.
- Бончев, Г., 1904. Базалтът в България. - Период. сп. на Българското книж. д-во, 45, 161-190.
- Димитров, Л., Ставрев, П., 1986. Магнитни методи в геофизиката. - Изд. ВМГИ, София, 434 с.
- Йовчев, Й. (отг. ред.) и др., 1971. Тектонски строеж на България. - ДИ "Техника", София, 558 с.
- Соловев, О.А. 1960. Способ интерпретации магнитных аномалий по вертикальному и горизонтальному градиенту Z_a . - Труды ИГГ АН СССР, Сиб. Отд., 1, 15-19.
- Ставрев, П., 1981. Подобни преобразования на гравитационните и на магнитните аномалии. - Българско геофизично сп., VII, 3, 95-106.
- Gerovska, D., Araúzo-Bravo, M., 2003. Automatic interpretation of magnetic data based on Euler deconvolution with unprescribed structural index. - Computers & Geosciences, (in press).
- Mavrudchiev, B.D., Moskovski, S.N., Nozarov, P.B., 1971. On the origin and evolution of Plio-pleistocene basalt magmatites in Bulgaria. - Comptes Rendus de l'Acad. bulg. des Sci., 24, 12, 1683-1687.
- Nozarov, P., Petkov, N., Kropacek, V., Krs, M., 1981. Application of magnetism and palaeomagnetism to petrogenetic studies of basalts, northern Bulgaria. - Journ. Geoph. Sci., Appl. Geoph., 13, 61-81.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. - Geophysics, 55, 80-91.
- Stavrev, P., 1997. Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity or magnetic anomalies. - Geophysical Prospecting, 45,2, 207-246.
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH – a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. - Geophysics, 47, 31-37.

EULER DECONVOLUTION OF MAGNETIC ANOMALIES OVER THE BASALTIC BODIES IN NORTHERN BULGARIA

Peter Stavrev¹, Daniela Gerovska², Marcos J. Araúzo-Bravo³

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700, stavrev@mgu.bg

² Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan, daniela@mine.kyushu-u.ac.jp

³ Burgos University, Burgos 09006, Spain, marara@dali.eis.uva.es

ABSTRACT

Euler deconvolution of magnetic anomalies over basaltic bodies along the Suhindol-Svishtov line in Northern Bulgaria was implemented. Original algorithms and programs for 3D Euler deconvolution using differential similarity transformations of the magnetic field was applied. This allowed simultaneous estimation of the singular point coordinates and the structural index, without requiring input data about the magnetization vector and the shape of the causative bodies. Thus, estimates of the depth range and the main features of the morphology of a number of basaltic bodies along the line of the paleovolcanic centers and their periphery were obtained. Most of the sources are vertical pipelike intrusions (volcanic necks) to the south and lenticular bodies to the north and along the periphery. The depth range of the massive bodies varies from several hundred meters to two kilometers.

INTRODUCTION

The basaltic bodies along the line Suhindol – Svishtov are the only manifestation of volcanic activity with outcrops at the surface in the typically platform setting of Central Northern Bulgaria. The interest towards these formations is supplied by the information they carry about the geologic structure and development of the Moesian platform in its southern part, as well as by the possibility to use them for the production from them of valuable construction material.

The presence of a number of natural outcrops of the basalts and quarries for their output had allowed comparatively detailed studies of their geologic characteristics and physical properties. Information about location, mineral composition, chemical constitution, magnetic properties and paleomagnetism of the basalts can be found in G. Bonchev 1904, Mavrudchiev *et al.* 1971, Jovchev *et al.* 1971, Nozarov *et al.* 1981, Bogdanov *et al.* 1983. Nevertheless, the information about the depth distribution of the basaltic bodies is scarce, and the published estimates of the source depths are of qualitative character (Nozarov *et al.* 1981).

In this article we present results from the application of one direct method for interpretation of magnetic anomalies with possibilities to give numerical estimates for both the depth and shape of the basaltic bodies. The method does not require a previously assumed geometrical and magnetic model and input data for the absolute value and direction of the magnetization vector.

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA

Fifteen separate basaltic bodies are exposed at the surface between the towns of Suhindol and Svishtov, along a line with azimuth 16° and length 35 km. Their size varies from 200 m to 1 km, forming in some places upland. The basalts are dark-colored and dense rocks, composed primarily of olivine and pyroxene, and belong to the sodium-alkaline type of the basalt-basanitic formation (Mavrudchiev *et al.* 1971, Bogdanov *et al.* 1983). The content of ferromagnetic components is comparatively high, from 6 up to 10%, represented mainly by titanomagnetite (Nozarov *et al.* 1981). The alignment of a number of outcrops along a single line is interpreted as a manifestation of a buried fault along which the magmatic

material intruded (Mavrudchiev *et al.* 1971, Jovchev *et al.* 1971). The solidified formations are of subvolcanic type, volcanic necks, and rarely dikes.

The magnetic and paleomagnetic characteristics of the rocks were studied from a number of oriented specimens, collected from natural and man-made outcrops of basaltic bodies (Nozarov *et al.* 1981). The magnetic susceptibility varies from 0.016 SI to 0.046 SI, which determines comparatively high values of the induced magnetization. The natural remanent magnetization is high, with Königsberger ratio between 2 and 26. The normal magnetization is prevailing but for three of the outcrops in the southern part a reverse remanent magnetization was measured. The varying ratios of the vectors of induced and remanent magnetization create diversity in the effective magnetization directions. Paleomagnetic studies estimated the age of the basalt products as Pliocene-Pleistocene, and the depth of the magnetic chambers to be 50 km.

The contrast between the magnetic properties of the basalts and the embedding them nonmagnetic sediments (sandy and clay loam, marl and limestone) is a reason for an intense manifestation of the basalts in the magnetic field. The magnetic anomalies in the area are measured with a middle-scale survey of the vertical component Z. Here they are presented with the calculated modulus T_a of the anomalous magnetic vector (Fig. 1). In the figure, the intense anomalies with amplitude greater than 100 nT are located over and around the outcropping basalts. The contour pattern is isometric with maxima of the anomaly values over the outcrops at the Varcha area, Butovo-yug and Chervena. The anomalies from the same line at Ovcha Mogila, Varbovka, Tashladzhik and Cherna Mogila have an average intensiveness of the maxima between 100 nT and 250 nT.

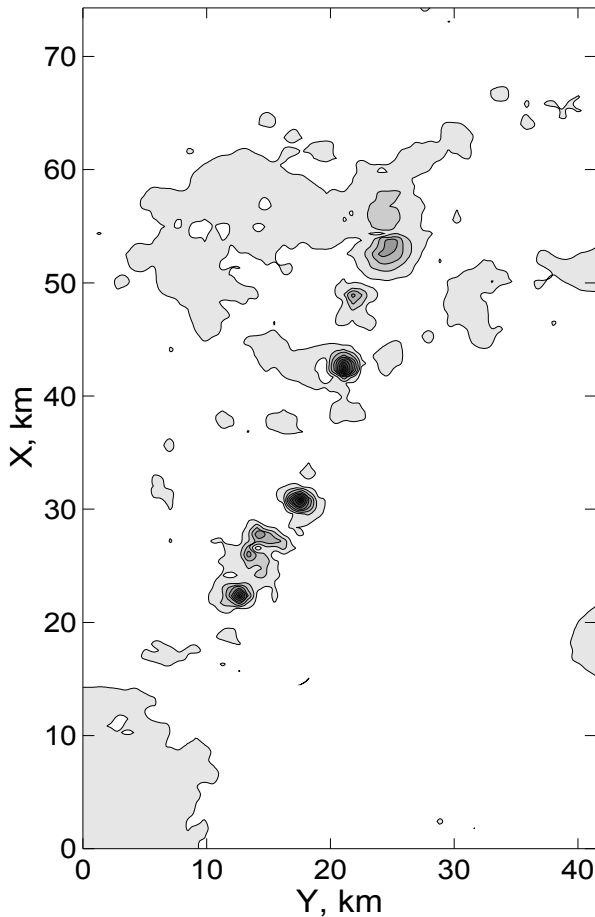


Figure 1. Map of modulus T_a , nT, of the anomalous magnetic vector, calculated from the measured component field Z .

Around these outcrops, at a distance of up to 15-20 km, several low intense magnetic anomalies with extrema below 100 nT can be observed. Their sources are probably buried relics from the area of outflow of the low viscous basaltic lavas. The magnetic anomalies reflect the joint effect of the magnetic bodies. Compared with the outcrops of these bodies, the magnetic anomalies T_a with their maximum and pattern give more information about the location and the shape of the massive intrusive body in plan view and depth. Inverse magnetic problems are posed and solved (see Dimitrov and Stavrev 1986) for obtaining such type of information. Their solutions determine the geometric and magnetic parameters of the source of the magnetic anomaly.

STUDY METHOD

The available information about the anomalous field and its sources in the area of interest advocates the use of direct method of solving of inverse problems. One of the effective direct methods, widely applied, is that of 2D or 3D Euler deconvolution. The latter name was suggested by Reid et al. (1990) but the approach was first proposed by Solovev (1960) and later independently developed in 2D by Thompson (1982). For sources of magnetic field A with one singular point $M(x_0, y_0, z_0)$ in the presence of a constant background B , Euler's homogeneity equation can be written as

$$(x - x_0) \frac{\partial A}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial A}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial A}{\partial z} = N(B - A), \quad (1)$$

where (x, y, z) are the coordinates of the observation point, $N = n$, where n is degree of homogeneity, and N is a coefficient, called structural index (Thompson 1982). The structural index depends on the geometry of the source. For a homogeneous point source $N = 3$, for a linear source (line of dipoles or poles, and for a homogeneous cylinder, rod, etc.) $N = 2$, for extrusive bodies (thin layer, dike, etc.) $N = 1$, for a contact, vertex of a block and a pyramid with a big height $N = 0$.

The unknown coordinates (x_0, y_0, z_0) are estimated by solving a determined system of linear equations (1) using a prescribed value for N with the least squares method. A solution with a minimum standard deviation is found through using different tentative values for N . The standard deviation should be below a given value, for example less than 15% to 25%, (Reid et al. 1990), the estimated source depth z_0 . The window size and the respective number of the observation points, for which the system of linear equations is formed taking the data of a grid or a profile, are also parameters in the solving the inverse magnetic problem.

Here we apply one improvement of the Euler deconvolution method, which allows linearisation of the system of equations with N as an unknown, and in the presence of a constant, as well as of a linear background (Stavrev 1997). The problem is solved using a differential similarity transformations (DST) of the component $A(x, y, z)$ of the anomalous magnetic intensity. DSTs are functions of the following type (Stavrev, 1981)

$$S[A] = (u - 3)A + (a - x) \frac{\partial A}{\partial x} + (b - y) \frac{\partial A}{\partial y} + (c - z) \frac{\partial A}{\partial z}, \quad (2)$$

where u is a parameter with values ranging from 0 to 3, so that $(u - 3) = -N$ in eq.(1), (a, b, c) are the coordinates of a point C , chosen for a center of the geometric similarity. When the similarity center $C(a, b, c)$ coincides with the singular point $M(x_0, y_0, z_0)$, then $S[A] = 0$ at all observation points. In the presence of a linear background Φ , a linear function $S[A + \Phi] = S[A] + S[\Phi]$ is obtained, since Φ has constant derivatives in eq. (2). On the bases of these properties, the problem is reduced to obtaining a linear distribution of the DST of the observed field $F = A + \Phi$. For the purpose, the residual dispersion of the linear regression for the F data is minimized. The operations are implemented within the limits of a given window along the data grid of a map or a profile. The quality of the result for the unknowns x_0, y_0, z_0 and N is estimated according to two criteria: (a) the relative standard deviation (as mentioned above), and (b) the value of N , which should be between 0 and 3, and with a standard deviation less than a given value, related to the desired degree of approximation (Stavrev 1997).

This described approach we implemented with the developed by Gerovska and Araúz-Bravo (2003) computer program for Euler deconvolution with unprescribed structural index. Along a data grid, windows of a given size are formed around each grid point. The window center is moved consecutively from point to point along rows and columns. Thus, the scheme of sliding and

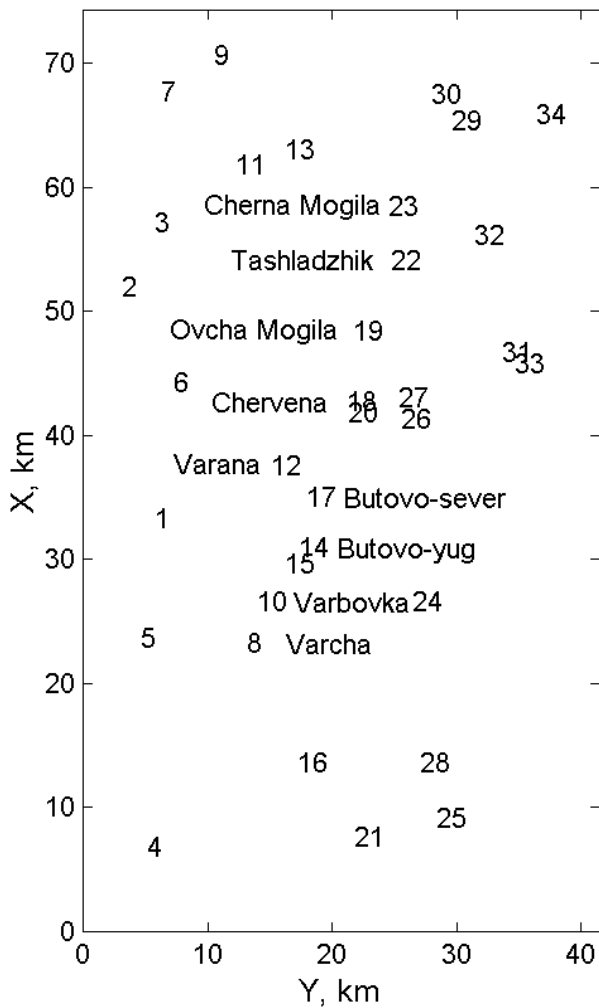


Figure 2. Indices of the formed Euler deconvolution solution clusters, corresponding to the basaltic bodies along the Suhindol-Svishtov line. The indices are used to find the corresponding statistical results for the clusters in Table 1.

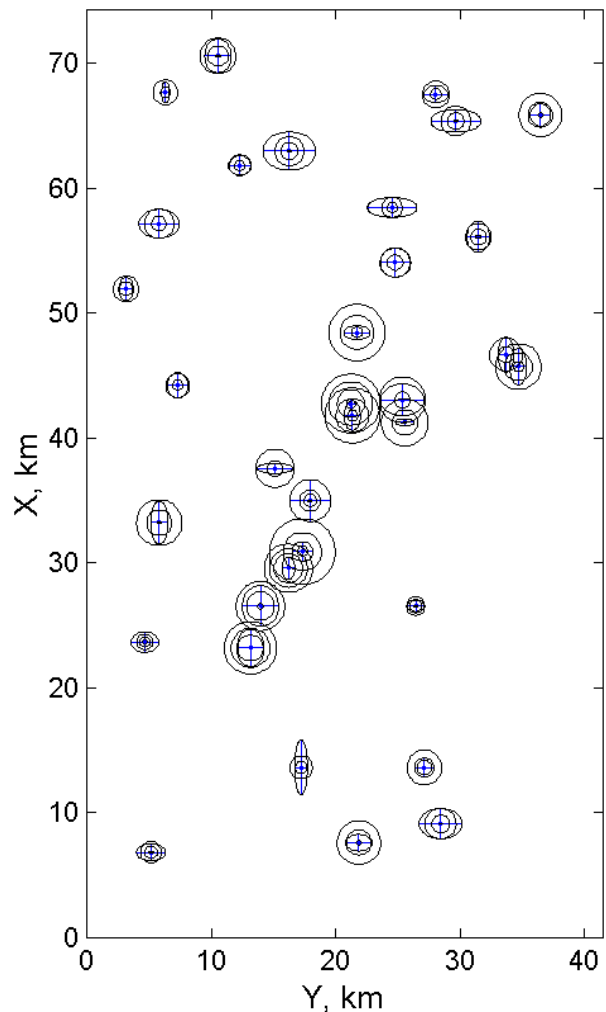


Figure 3. Plan view of the estimated location of the center of gravity of the Euler deconvolution solution clusters with confidence intervals, depicted as concentric circles for the depth and ellipses of confidence for the horizontal position.

overriding windows is implemented. The obtained acceptable solutions for x_0 , y_0 , z_0 and N for sets of neighboring windows are statistically processed. Groups of results related to each separate source are formed with calculation of the mean value and a confidence interval for each estimated parameter.

RESULTS

Three-dimensional Euler deconvolution of the anomalous magnetic field over an area of 3000 km² (Fig. 1) over outcropping and possibly covered basaltic bodies along the Suhindol-Svishtov line was carried out.

According to the width of the anomalous magnetic field manifestations and the initial estimates for the depths of internal points of the bodies, the half width of the window is determined to be 3.2 km. Thus, one window includes 121 data grid points, from which solution for the 4 unknowns x_0 , y_0 , z_0 and N is obtained.

In Fig. 2, in a plan view of the map of the magnetic field, the numbers of the detected 34 clusters of solutions for the location of sources of magnetic anomalies of different intensiveness are presented. Their horizontal location and the

depth with the ovals showing the confidence intervals of the obtained values are given as a graph in Fig. 3, and numerically in Table 1. The analysis of the obtained results gives us the opportunity to interpret the pattern of the anomalous magnetic field, outlining the following line characteristic points.

The highly intense magnetic anomalies at Varcha, with number 8 in Fig. 2, at Butovo-yug with numbers 14-15, and at Chervena with numbers 18 and 20, have similar values for the depth z_0 and the structural index N . The depth to the internal similarity point of the bodies is within the interval 650 m and 860 m, mean value 760 m, and the structural index N is between 1.56 and 2.51, mean value 2.22. The latter speaks of a widened column-like shape of the basaltic bodies, most probably volcanic necks. According to the pattern and the intensiveness of the anomalies, these are vertical and sub-vertical massive bodies with depth to the bottom at least twice z_0 , i.e. at least 1.5 km.

The anomalies with middle range intensiveness can be subdivided into two groups according to the results of the Euler deconvolution. The first group includes the anomalies at Varbovka, number 10, and at Ovcha Mogila, number 19. The depth z_0 is respectively 570 m and 670 m, and the structural index 1.87 and 1.99. From the values of N , we can conclude that the shape of the bodies is column-like. The body

parameters are close to those of the previously described ones for the intense anomalies, but the body mass is either smaller or their shape is less elongated in depth. The second group of results is related to the bodies at Tashladzhik (number 22) and at Cherna Mogila (number 23). There, the depths z_0 are considerably shallower, 310 m and 200 m, and the values of the structural index are smaller 0.66 and 0.30, respectively. Such indices are typical of thin layers and dikes ($N = 1$), or of thicker layer shaped bodies and contacts with upper vertices

Table 1. Estimated coordinates singular points and structural indices with their confidence intervals of the basaltic sources of the anomalous magnetic field along the Suhindol-Svishtov line. The estimation is for a window of 11×11 grid points at ground level. Column $No_{sol.}$ shows the obtained number of solutions for one source. The confidence intervals are calculated for 95% confidence.

Index	$No_{sol.}$	x_0, km	y_0, km	z_0, km	N
1	42	33.24±1.67	5.81±0.68	0.50±0.41	0.56±0.68
2	11	51.95±0.88	3.13±0.57	0.27±0.23	0.60±0.63
3	59	57.17±1.13	5.78±1.60	0.29±0.30	0.61±0.70
4	6	6.84±0.66	5.15±1.16	0.26±0.16	0.22±0.37
5	11	23.66±0.80	4.65±1.09	0.21±0.09	0.19±0.27
6	48	44.21±1.02	7.29±0.85	0.20±0.27	0.38±0.75
7	5	67.68±0.78	6.30±0.29	0.21±0.27	0.41±0.52
8	76	23.21±1.46	13.14±1.09	0.78±0.26	2.40±1.11
9	8	70.60±1.34	10.53±1.08	0.40±0.30	0.84±0.86
10	44	26.56±1.61	13.94±1.45	0.56±0.42	1.87±1.34
11	8	61.84±0.75	12.30±0.92	0.20±0.22	0.56±0.78
12	17	37.58±0.41	15.11±1.42	0.31±0.45	0.85±1.17
13	77	62.99±1.51	16.27±2.08	0.33±0.24	0.83±0.83
14	68	30.91±0.78	17.32±0.82	0.76±0.55	2.21±1.76
15	20	29.60±0.87	16.19±0.50	0.77±0.19	2.50±0.39
16	11	13.65±2.17	17.21±0.51	0.23±0.22	0.44±0.86
17	16	35.00±1.67	17.94±1.63	0.25±0.17	0.56±0.71
18	14	42.77±0.41	21.20±0.36	0.86±0.32	2.42±1.03
19	39	48.45±0.55	21.70±1.03	0.67±0.45	1.99±1.52
20	15	41.82±1.17	21.33±0.64	0.65±0.44	1.56±2.31
21	10	7.61±0.66	21.85±1.04	0.49±0.38	0.93±0.96
22	89	54.05±1.14	24.78±1.24	0.31±0.27	0.66±0.71
23	7	58.47±0.78	24.53±1.96	0.19±0.21	0.30±0.66
24	6	26.55±0.52	26.42±0.64	0.23±0.13	0.34±0.44
25	62	9.13±1.18	28.43±1.70	0.34±0.27	0.74±0.83
26	5	41.27±0.26	25.54±0.74	0.50±0.44	0.39±1.05
27	8	43.07±1.26	25.35±1.75	0.32±0.59	0.61±0.78
28	6	13.64±0.73	27.12±0.79	0.28±0.40	0.57±0.87
29	31	65.39±0.88	29.65±1.99	0.33±0.26	0.84±0.61
30	8	67.52±0.68	28.05±0.94	0.22±0.31	0.73±0.83
31	33	46.68±1.39	33.68±0.61	0.33±0.33	0.69±0.83
32	30	56.11±1.23	31.46±0.90	0.30±0.21	0.63±0.62
33	54	45.73±1.43	34.68±0.67	0.55±0.35	1.12±0.65
34	37	65.87±0.91	36.45±0.81	0.49±0.37	1.37±1.03

close to the surface ($N = 0$). For intermediate values of N the body shape can be estimated as lenticular or parallelepiped with various thickness. In the studied case, it is probable that there exists preserved material in the craters of the two close paleovolcanos in the northern part of the Suhindol-Svishtov line.

At the periphery of the outcropping basalt bodies, where magnetic anomalies of low intensiveness are observed, the results indicate, without exceptions, comparatively shallow depths z_0 and small structural index values N . From the marked

20 anomalies (Figures 2, 3 and Table 1), depths within the interval 200 - 500 m, mean value 320 m, and structural indices ranging from 0.19 to 1.12, mean 0.64, were obtained. These results could be interpreted as reflecting the presence of thin to thicker buried remains of lava flows, filling the deeper forms of the paleorelief.

CONCLUSION

The results from the interpretation of the anomalous magnetic field in the region along the Suhindol-Svishtov line using the Euler deconvolution method with unprescribed structural index show in practice the possibilities for estimation of the depth and the shape of the causative bodies with a minimum of required information about the geometry and the magnetization of the bodies. The obtained results are in correspondence to the geologic idea for neck shaped basaltic bodies in the paleovulcanic craters. Besides, the magnetic data interpretation marks bodies from the outflow of basaltic lava.

The source depth and shape estimates can effectively serve as approximations for the construction of magnetic models of the basaltic bodies in the studied area. For the purpose, more detailed and precise magnetic surveys over and around the source outcrops should be done.

REFERENCES

- Bogdanov, B. (chief editor) *et al.*, 1983. Magmatism and metallogeny of the Carpatian Balkan zone. BAN, Sofia, 300 p., (in Russian).
- Bonchev, G., 1904. The basalt in Bulgaria. - *Period. sp. na Balgarskoto knizh. d-vo*, 45, 161-190, (in Bulgarian).
- Dimitrov, L., Stavrev, P., 1986. Magnetic methods in geophysics. – Publishing house VMGI, Sofia, 434 p, (in Bulgarian).
- Jovchev, J. (editor in charge) *et al.*, 1971. Tectonic structure of Bulgaria. - Tehnika, Sofia, 558 p, (in Bulgarian).
- Solovev, O. A., 1960. A method of magnetic interpretation using the vertical and horizontal gradients of Z_a . – Proc. IGG Siberian Br. Acad. of Sc., 1, 15-19, (in Russian).
- Stavrev, P., 1981. Similarity transformations of the gravity and magnetic anomalies.- *Bulgarian Geophysical Journal.*, VII, 3, 95-106, (in Bulgarian).
- Gerovska, D., Araúzo-Bravo, M., 2003. Automatic interpretation of magnetic data based on Euler deconvolution with unprescribed structural index. - *Computers & Geosciences*, (in press).
- Mavrudchiev, B.D., Moskovski, S.N., Nozarov, P.B., 1971. On the origin and evolution of Plio-pleistocene basalt magmatites in Bulgaria. - *Comptes Rendus de l'Acad. bulg. des Sci.*, 24, 12, 1683-1687.
- Nozarov, P., Petkov, N., Kropacek, V., Krs, M., 1981. Application of magnetism and palaeomagnetism to petrogenetic studies of basalts, northern Bulgaria. - *Journal of Geophysical Science, Applied Geophysics*, volume 13, 61-81.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. - *Geophysics*, 55, 80-91.
- Stavrev, P., 1997. Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity or magnetic anomalies. - *Geophysical Prospecting*, 45, 2, 207-246.
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH – a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. - *Geophysics*, 47, 31-37.

*Recommended for publication by Department
Applied Geophysics, Faculty of Geology and Prospecting*