

ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ОТКРИТИ РУДНИЦИ

Деница Борисова¹, Христо Николов¹, Бануш Банушев², Дойно Петков¹

¹ИКСИ-БАН, 1113 София; dborisova@stil.bas.bg

²Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; banushev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Минната дейност в Европа се разпростира от големи площи с огромни открити рудници до съвсем малки карирери. В настоящата работа са анализирани спектрални данни от апаратурата на борда на спътника Landsat TM с цел определяне на площта на открити рудници и препоръки за планиране и осъществяване на рекултивационни работи. Предимството на този вид данни е, че са в цифров вид, лесни са за обработка и анализ в различни информационни формати. За верификация на резултатите са проведени наземни спектрометрични измервания на образци от изследваните райони. Използвани са дву- и три-компонентни линейни модели за оценка на минералното съдържание в откритите мини като са използвани сателитни данни за същия район. Колективът планира да приложи регресионен и клъстерен анализ за разграничаване на класовете земно покритие. Също така в моделите ще се включат повече минерали, скали и почви.

REMOTE SENSING TECHNIQUES IN MONITORING OF OPEN PIT MINES

Denitsa Borisova¹, Hristo Nikolov¹, Banush Banushev², Doyno Petkov¹

¹Space and Solar-Terrestrial Research Institute, Bulgarian Academy of Science, 1113 Sofia; dborisova@stil.bas.bg

²University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; banushev@mgu.bg

ABSTRACT. Surface mining activities in Europe are estimated to cover a large area and range from large open-cast coal and base metal mines, to much smaller aggregate, industrial minerals, and building materials quarries. In this paper we suggest that the availability of Landsat TM for Earth observation allows the collection of environmental and mine-related data for use in the planning and undertaking of mine restoration work on cost-effective basis. The advantage is that these data are acquired digitally and can be easily processed and utilized in various information formats. For verification of the results spectrometric measurements of samples from test sites are performed. Two- and three-component linear models for estimation of the mineral composition of an open pit are created using satellite data over the same area. Further regression and cluster analysis for distinguishing class covers as dump and open mine is intended. As a future work we consider the development of these models including more minerals, rocks and soils.

Въведение

В настоящата работа са използвани статистически методи за анализиране на спектрални данни при мониторинга на открити рудници като изследванията са извършени в района на находище Елаците и прилежащото хвостохранилище Бенковски. Използвани са множеството възможности, които предлагат многоспектралните изображения със средна резолюция от сензори като TM/ETM+ на борда на Landsat. Чрез методът, който прилагаме, се търсят стабилни статистически зависимости между полевите многоспектрални данни и цифровите данни от изображенията, получени от сензори на борда на летящи апарати. След коректно разпознаване на съответните пиксели последващото определяне на изучаваната наземна форма може да се приеме като надеждно. Полевите измервания са извършени на образци от изучавания район. За него са обработени съответните изображения от сензорите TM/ETM+ на борда на спътника Landsat от различни дати. Проведени са и in-situ спектрометрични измервания, за което е използван полеви спектрометър TOMS, разработен и конструиран в секция

Системи за дистанционни изследвания (Petkov et al., 2005). Проведени са геоложки наблюдения и петрографски изследвания на района.

Материали и методи

В процеса на изготвяне на тази работа за получаване, обработка и визуализиране на данните, беше избран програмният продукт MultiSpec. MultiSpec е програма обработваща многоспектрални данни, получени чрез сателитни наблюдения на земната повърхност, най-често посредством спътници от серията Landsat. Програмата разполага с надеждни методи за интерпретация и анализиране на изображения, получени от сателитно базирана апаратура. Възможностите и подобренията в последната версия на тази програма включват:

- визуализиране на многоспектрални изображения в черно-бели или цветни формати, използвайки линейна или квадратична промяна на контраста;
- визуализиране на тематични изображения също в черно-бели или цветни формати, с възможност за контролиране на яркостта;

- разнообразие при реформатирането на файлове с данни, т.е. прибавяне на стандартни хедъри, промяна на типа на формата във всеки един от позволените, комбиниране на файлове, добавяне или подмяна на описанието на каналите, мозайкиране на данни или промяна геометрията на данни;
- извеждане на хистограми като графики и таблици, както и използването им за подобряване на режима на извеждане;
- създаване на нови канали с данни от съществуващи такива. Новите канали могат да бъдат получени при процедура за анализ по основните компоненти и отношения на линейни комбинации от съществуващи канали;
- клъстеризация на данни (вкл. по алгоритъм Isodata) и запазване на резултатите като тематична карта заедно със статистика за всеки един от класовете;
- дефиниране на обучаващи и тестващи класове, селектирайки ги в правоъгълник или полигон за последващата обработка, както и за маскиране на даденото изображение и изчисляване на статистика с така създадените класове;
- определяне на най-подходящите характерни особености на базата на спектрални данни за използването им в определен алгоритъм за класификация посредством търсене на най-доброто подмножество, използвайки различни статистически методи за оценка на разстоянията до центровете на клъстерите, например: метод, базиран на дискретното формиране на разделителни граници от обучаващите множества и метод, базиран на дискриминантни функции;
- за класифициране на означения район във файл с данни са налични следните алгоритми за класификация: минимално разстояние до средните; алгоритъм на максимално правдоподобие; ECHO-спектрално-пространствен класификатор;
- запазването на резултатите от класификацията може да се осъществи с показване или скриване на обучаващите и тестващите полигони;
- извеждане резултатите от класификацията на обучаващите и тестващи полигони в таблична форма за клас или за група от класове;
- цветно представяне на корелационна матрица за клас или подклас, като средство при визуализацията на многоспектрални данни;
- непосредствено прехвърляне на междинни или крайни резултати под формата на текст, черно-бели или цветни изображения към други приложения, работещи под операционна система WINDOWS (MS WORD, MS EXCEL, PHOTOSHOP).

MultiSpec е разработен за платформа win32 и неговата работоспособност се ограничава само от апаратните средства на компютъра. Версия на продукта и документацията към него, могат да бъдат намерени на: <http://dynamo.ecn.purdue.edu/~biehl/MultiSpec>

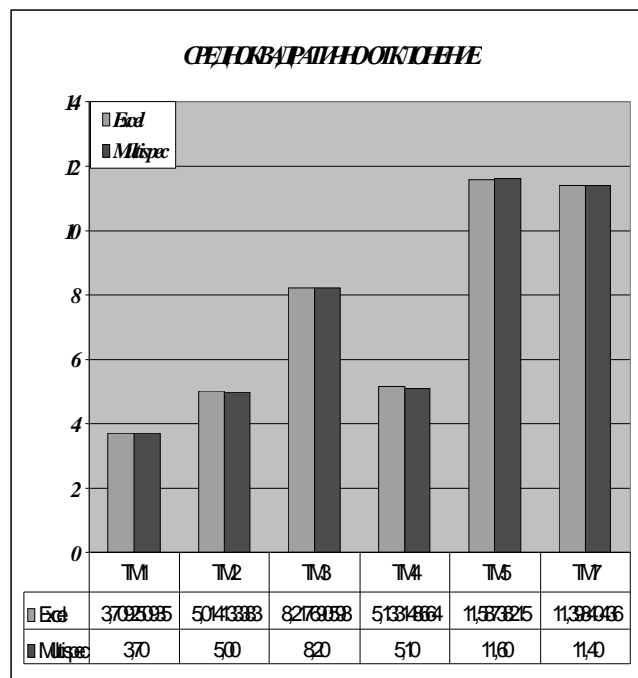
В рамките на изследването бяха използвани данни от апаратура за изследване на земната повърхност TM и ETM+, която се носи от спътник от серията Landsat. Тъй като и двата инструмента имат еднаква пространствена и

радиометрична (8bit от 9 измерени) разделителна способност, което осигурява съпоставимост на данните. От множеството налични данни бяха подбрани тези за месец юни, което гарантира следните две условия: минимално покритие на сцената с облаци; растителността е достигнала максимума на вегетационният си цикъл.

В настоящата работа основно внимание бе отделено на два обекта от земното покритие, а именно: хвостохранилище "Бенковски I", където се изнасят отпадъчните продукти от Елаците, и близкостояща нива, западно от хвостохранилището. Проследена е динамиката на изменение за големи периоди от време на гореспоменатите обекти и затова са използвани данни за спектралното отражение от две различни години – 1987 и 2000. Съвместяването на радиометричните характеристики за 1987 година бе осигурено чрез извършване на мозайка от две съседни сцени.

За гарантиране получаването на коректни резултати от използването на програмният продукт MultiSpec беше направена верификация върху данните (обект: нива, западно от хвостохранилище "Бенковски I", 2000 г.) със сходни функции от MS Excel (изчисляване на средноквадратично отклонение чрез стандартна функция STDEV).

Показаните на фигура 1 резултати са доказателство за това, че получаваните от MultiSpec данни могат да бъдат използвани като достоверен източник на информация за изследваните спектрални класове.



Фиг. 1 . Сравнителна графика между Excel и MultiSpec

Геолого-петрографска характеристика

В района на находище "Елаците" се разкриват палеозойски нискометаморфни скали (Берковска група), гранодиорити (Веженски плутон) и разнообразни дайки

(Куйкин и др., 1971; Богданов, 1987; Dragov, Petrunov, 1996; Kamenov et al., 2002; von Quadt et al., 2002).

Метаморфитите са представени от филити, в по-малка степен диабази и хлорит-серицитови шисти. Сред тях е внедрен така нар. Елашки горнокреден интрузив. В приконтактните части на Веженския плутон и скалите на Берковската група метаморфитите са контактно променени в хорнфелзи. Филитите се разкриват в южните части на района, извън границите на кариерата. Те са сивозелени до тъмносиви с шистозна текстура и микрогранолепидобластна структура. Изградени са предимно от кварц и серицит. На места в тях се наблюдават неиздържани кварцови жили и лещи. Хорнфелзите са развити в южните части на находището в приконтактните части на Веженския плутон и скалите на Берковската група. Те са тъмносиви до черни, микрозърнести с масивна, на места шистозна текстура. Структурата е микролепидогранобластна, в отделни участъци – микрогранолепидобластна. Сред тях се установяват неиздържани жилки и лещи от метаморфогенен кварц. Изградени са от дребно- до микрозърнест, неравномернозърнест агрегат от кварц, биотит, плагиоклаз, К-фелдшпат, Fe-Ti минерали, албит, калцит, хлорит, апатит и рудни минерали. В метаморфитите на Берковската група се установява скарнова минерализация от гранат, калцит, хлорит, кварц, епидот, магнетит и хематит.

Гранодиоритите заемат по-голяма част от находището. Те са сиви, сивозелени, мезократни, средно- до едрозърнести, равномерно- до неравномернозърнести с масивна текстура и хипидиоморфнозърнеста структура, на места преминаваща в монзонитова. В тектонизираните участъци първичната хипидиоморфнозърнеста структура преминава в катакластична, а в зоните с най-интензивна тектонска обработка и хидротермални промени първичните структурно-текстурни особености на скалите

са заличени а скалообразуващите минерали са изцяло деструктурирани. Гранодиоритите са изградени от първичномагматичен плагиоклаз, кварц, К-фелдшпат, амфибол, биотит, апатит, циркон, титанит, аланит-(Ce) и вторични – дребнолюспеста бяла слюда, хлорит, епидот, биотит, К-фелдшпат, кварц, албит, цоизит, клиноцоизит, по-рядко пренит и пумпелиит. Акцесорните минерали са представени от апатит, циркон, титанит, аланит-(Ce) и магнетит. Въз основа количествените съотношения на мафичните минерали гранодиоритите са определени като биотит-амфиболови и амфибол-биотитови. Гранодиоритите са процепени от дайки с разнообразен състав – микродиорити, диоритови порфирити, кварцмонцоидиоритови порфирити, гранодиоритови порфирити, гранитпорфири и аплити. В периферните части на плутона се срещат микрозърнести включения от габро, диорити, монцоидиорити, кварцмонцоидиорити и редки ксенолити от биотит-андалузитови хорнфелзи. Скалите са висококалиеви, Са-алкални, метаалуминиеви до пералуминиеви (Kamenov et al., 2002).

Районът около хвостохранилище Бенковски е изграден от високометаморфни скали с предполагаема докамбрийска възраст, отнасящи се към Арденската група. Представени са от мигматизирани, биотитови, мусковитови, по-рядко двуслюдени гнайси с ивичеста, очно-ивичеста и очна текстура. Сред тях се срещат прослойки от амфиболити, амфибол-биотитови гнайси, гнайсошисти, силиманитови и кианит-силиманитови шисти (Дабовски и др., 1972).

Резултати и дискусия

С помощта на описания програмен продукт бяха получени показаните по-долу статистически параметри, характеризиращи обектите на настоящото изследване. Резултатите са обобщени в таблици 1 и 2.

Таблица 1. Обект: Нива, разположена западно от хвостохранилище "Бенковски I" към рудник Елаците

Година	Средни стойности					
1987 Брой пиксели 540	125.46559	62.046848	80.312898	66.661076	81.446501	43.662233
	Средноквадратично отклонение					
	17.56	11.42	19.41	18.43	47.92	29.51
Година	Средни стойности					
2000 Брой пиксели 3177	88.2	78.4	89.7	84.8	117.1	78.7
	Средноквадратично отклонение					
	3.70	5.00	8.20	5.10	11.60	11.40

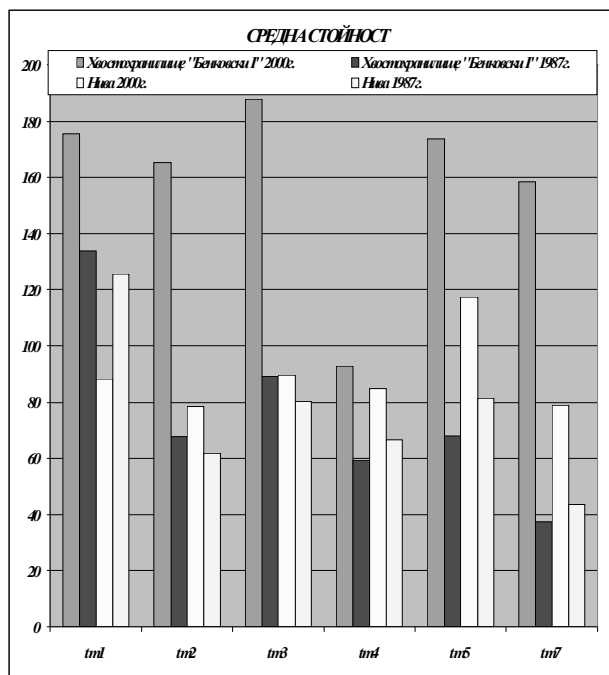
Таблица 2. Обект: Хвостохранилище "Бенковски I" към рудник Елаците

Година	Средни стойности					
1987 Брой пиксели 1189	133.63667	67.721615	89.060555	59.223717	68.126997	37.232969
	Средноквадратично отклонение					
	15.006896	8.5270487	15.507822	16.360286	52.511794	33.417567
Година	Средни стойности					
2000 Брой пиксели 768	175.5	165.2	187.7	92.8	173.9	158.4
	Средноквадратично отклонение					
	19.4	21.9	27.6	13.5	30.9	37.7

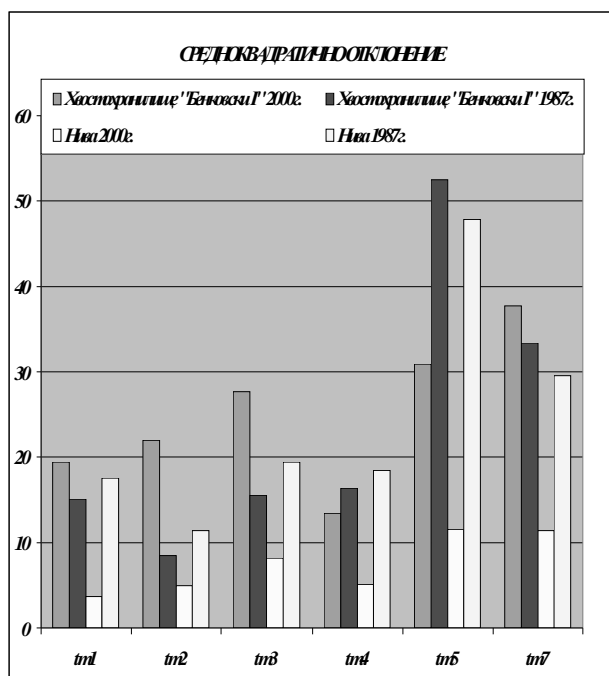
На фигури 2 и 3 графично са представени получените стойности. От фигура 2, съгласно предложената от NASA

методика за формиране на спектрални класове, могат да се отделят четири такива класа. Тъй като динамиката на

стойностите във всеки един от спектралните канали е 8bit, средноквадратичното отклонение (фиг. 3) следва да бъде по-малко от 10%, т.е. 25DN. За TM5 тези отклонения са над допустимата стойност, поради което този спектрален канал няма да бъде разглеждан като параметър за следващите етапи в процеса на интерпретация.



Фиг. 2. Средни стойности на формираните спектрални класове



Фиг. 3. Стандартни отклонения от средните стойности на спектралните класове

В таблици 3 и 4 са показани корелационните матрици за двата класа-предмет на разглеждане за двете години. Корелационните зависимости бяха изчислени по формулата:

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$-1 \leq \rho_{x,y} \leq 1$$

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

Таблица 3. Обект: Хвостохранилище "Бенковски I" към рудник Елаците – корелационна матрица

Обект: Хвостохранилище "Бенковски I"						
Година 1987						
Канал	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1.00					
TM2	0.77	1.00				
TM3	0.41	0.88	1.00			
TM4	0.21	-0.34	-0.69	1.00		
TM5	0.15	-0.42	-0.70	0.82	1.00	
TM7	0.20	-0.33	-0.58	0.70	0.97	1.00
Година 2000						
Канал	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1.00					
TM2	0.99	1.00				
TM3	0.98	0.99	1.00			
TM4	0.97	0.99	0.99	1.00		
TM5	0.88	0.92	0.94	0.95	1.00	
TM7	0.85	0.90	0.91	0.93	0.99	1.00

Таблица 4. Корелационна матрица за обект нива, разположена западно от хвостохранилище "Бенковски I" към рудник Елаците

Обект: Нива						
Година 1987						
Канал	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1.00					
TM2	0.86	1.00				
TM3	0.85	0.95	1.00			
TM4	0.75	0.79	0.83	1.00		
TM5	0.87	0.83	0.85	0.78	1.00	
TM7	0.78	0.79	0.80	0.62	0.88	1.00
Година 2000						
Канал	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1.00					
TM2	0.83	1.00				
TM3	0.76	0.87	1.00			
TM4	0.29	0.38	0.20	1.00		
TM5	0.67	0.78	0.80	0.43	1.00	
TM7	0.71	0.81	0.82	0.26	0.91	1.00

В случая разглеждаме само абсолютната стойност на този коефициент, тъй като е необходимо да бъдат намерени слабо корелирани спектрални канали, за които е прието абсолютната стойност да бъде под 0.35. Празните клетки в таблици 3 и 4 отразяват повтарящите се коефициенти по диагонала.

Оформените матрици с корелационни коефициенти за отделните канали в така дефинираните класове дават информация за степента на линейност на корелацията между различните канали. Критерий за това е близостта на корелационните коефициенти до единица. С помощта на така изчислените коефициенти на корелация може да се направи следният извод: за спектрален клас "Хвостохранилище "Бенковски I", година 1987", информативни комбинации от канали са ТМ1/ТМ4, ТМ1/ТМ5 и ТМ1/ТМ7; за спектрален клас "Нива, година 2000", информативни комбинации от канали са ТМ3/ТМ4, ТМ4/ТМ1 и ТМ4/ТМ7.

Изложеното до тук ни дава основание да твърдим, че наличната спектрална информация не е достатъчна за коректна класификация на двата обекта – предмет на изследването. Затова промяната във времето за клас "Хвостохранилище "Бенковски I" година 2000" беше направена посредством визуална интерпретация на изображенията, използвайки комбинация от канали: ТМ 4=R; ТМ 3=G; ТМ 2=B. Тази комбинация се оказва най-подходяща за надеждно дешифриране на този спектрален клас. Посредством нея за 2000 г. бяха подбрани, като част от непрекъснатата площ, 2911 пиксела. Изхождайки от параметрите на ЕТМ+ бе изчислено, че обхванатата от тях площ, е 2364 дса, като допуснатата грешка е по-малко от 1%. Имайки данни от дистанционните изследвания, проведени за 1987 г. за същото хвостохранилище се забелязва нарастване на неизползваемите селскостпански площи със 1163 дса. Това намаляване на използваемата обработваема площ в района спомага за влошаване на общото екологично състояние.

Заклучение

В заключение може да се каже, че в процеса на провеждане на мониторинг на открити рудници, данните от дистанционни изследвания на Земята са надежден източник на допълнителна, основно спектрална, информация за обекти от подстилащата повърхност. Една характерна особеност, която следва да се вземе пред вид е, че данните от дистанционни изследвания следва да бъдат преобразувани първо в спектрален, а в последствие и в информационен клас обекти. При това преобразуване важно място заемат статистическите методи на обработка. В хода на изследванията основен програмен продукт за визуализация и статистическа обработка на данните беше използван MultiSpec. Това позволи успешна визуална интерпретация на наличните спектрални данни, посредством която бе определена площта на изследваните обекти.

Получените параметри доказаха, че директното прилагане на чисто статистически подход не е удачен. Това наложи визуална интерпретация на данните, като преди това бяха проверени всички възможни комбинации от канали и бе подбрана следната: ТМ4=R; ТМ3=G и ТМ2=B. Чрез тази комбинация бе доказано, че възможната селскостопанска площ в проучваният район, е намаляла с

1163 дса., което води до увеличаване на екологичния риск. Показаните на Фигура 2 стойности ни дават основание да се съмняваме дали през 1987 г. хвостохранилище "Бенковски I" е било в активна експлоатация.

От проведените изследвания се налага извода, че добри резултати могат да бъдат постигнати само при използване данни, получени в повече различни години за изследвания район, както и провеждане на съответните полеви спектрометрични изследвания. Само така можем да очакваме повишаване на точността в още по-голяма степен, но отчитайки липсата на данни за годините, казаното до тук ни дава основание да твърдим, че така използваната методика води до надеждни резултати при решаване на практически проблеми при различни проучвания. Също така е възможно и директното и прилагане за нуждите на почвознанието и екологичния мониторинг на открити рудници.

Литература

- Богданов, Б. 1987. *Медните находища в България*. С., Техника, 388 с.
- Дабовски, Х., И. Загорчев, М. Русева, Д. Чунев. 1972. Палеозойските гранитоиди в Същинска Средна гора. – *Год. Гл. упр. геол.*, 16, 57-95.
- Куйкин, С., Я. Герчева, Л. Миланов, Ст. Христов. 1971. Геологичен строеж на Стара планина между Златишкия и Троянския проход. – *Юбил. год. Ком. геол.*, 179-200.
- Dragov, P., R. Petrunov, 1996. Elatsite porphyry copper – precious metal (Au and PGE) deposit. Plate tectonic aspects of the Alpine metalogeny in the Carpatho-Balkan region. – *Proceeding of the annual meeting, Sofia, 1996, UNESCO – IGCP Project 356*, 1, 171-174.
- Kamenov, B., A. von Quadt, I. Peycheva. 2002. New insight into petrology, geochemistry and dating of the Vejen pluton, Bulgaria. – *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, 40, 1-14.
- Petkov, D., G. Georgiev, H. Nikolov. 2005. Thematically oriented multichannel spectrometer (TOMS). – *Aerospace Research in Bulgaria*, 20, 51-54.
- von Quadt A., I. Peycheva, B. Kamenov, L. Fanger, C. Heinrich, M. Frank. 2002. The Elatsite porphyry copper deposit in the Panagyurishte ore district, Srednogorie zone, Bulgaria: U-Pb zircon geochronology and isotope-geochemical investigations of magmatism and ore genesis. – In: *The Timing and Location of Major Ore Deposits in an Evolving Orogen* (Eds. *Blundell, D.J., Neubauer, F., von Quadt, A.*). *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 204, 119-135.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Приложна геофизика", ГПФ