ГОДИШНИК
НА
МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ
"СВ. ИВАН РИЛСКИ" – СОФИЯ

Том 59

Свитък I: Геология и геофизика

ANNUAL
OF
UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY
"ST. IVAN RILSKI" – SOFIA

Volume 59

Part I: Geology and Geophysics

Издателска къща "Св. Иван Рилски"
Publishing House "St. Ivan Rilski"
София, 2016
Sofia, 2016

ISSN 1312-1820

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

доц. д-р Павел Павлов – главен редактор
доц. д-р Вяра Пожидаева – зам. главен редактор
проф. д-р Йордан Кортенски – председател на редакционен съвет
доц. д-р Елена Власева – председател на редакционен съвет
доц. д-р Антоанета Янева – председател на редакционен съвет
проф. д-р Десислава Костова – председател на редакционен съвет
инж. Александрина Пачалова – секретар

РЕДАКЦИОНЕН СЪВЕТ
на Свитък I: Геология и геофизика

проф. д-р Йордан Кортенски – председател
проф. дгн Димитър Синьовски
проф. д-р Ради Радичев
проф. д-р Страшимир Страшимиров
доц. д-р Николай Стоянов

С Ъ Д Ъ Р Ж А Н И Е

Раздел 1 – Геология, минералогия и полезни изкопаеми

Йордан Кортенски **Александър Здравков**	Пепелообразуващи елементи във въглища от Гоцеделчевския басейн, България	**9**
Димитър Петров	Лазерна „Раман" спектроскопия и LA-ICP-MS анализи на мед-съдържащи пирит и сфалерит от златно-медно находище Челопеч	**17**
Димитър Петров	Самородно злато и телурови минерали от дълбочинна супергенна зона в Au-Cu находище Челопеч	**23**
Георги Лютов	Елементи-примеси в коломорфен марказит и халкопирит от сребърно-златното находище Седефче, Източни Родопи	**29**
Георги Лютов	Елементи-примеси в сфалерит, пираргирит, пирит и арсенопирит от сребърно-златното находище Седефче, Източни Родопи	**35**
Борис Вълчев	Каньонът на река Петър (Петра, Петраница) между селата Губислав и Миланово (Западна Стара планина)	**41**
Руслан И. Костов **Радостин Паздеров** **Любомир Михайлов**	Минерален състав на ясписи от Източните Родопи	**47**
Добринка Ставракева **Николета Цанкова**	Химико-минераложка характеристка на древни шлаки от Росенското рудно поле Част 1 – находище "Пропаднала вода"	**55**
Николета Цанкова **Добринка Ставракева** **Петър Лещаков** **Калин Димитров**	Химико-минераложка характеристика на древни шлаки от Росенското рудно поле Част 2 – находища "Коручешме" и "Росен", металургичен център "Атия"	**61**
Н. Калцукова **Д. Синьовски** **Н. Телнова** **Н. Дронин** **Д. Юсеинова**	Картографска поддръжка на кандидатстващия геопарк Белоградчишки скали	**67**
Димитър Синьовски **Наталия Калуцкова** **Николай Дронин** **Валентина Николова**	Международни измерения на кандидатстващия геопарк Белоградчишки скали	**71**
Красимира Кършева	Моделиране на мостови съоръжения и хидравлични анализи с HEC-RAS в Тунджанското структурно понижение, в района на гр. Елхово	**78**

Ирена Костова	Петрография, минералогия и геохимия на въглища от Пчеларовското находище, Източни Родопи I част. Петрографска и минераложка характеристика	**83**
Ирена Костова	Петрография, минералогия и геохимия на въглища от Пчеларовското находище, Източни Родопи II част. Геохимична характеристика	**91**
Богдан Проданов **Любомир Димитров**	Интегрална гео-база данни за акваторията на Авренското крайбрежие (н. Галата до н. Иланджик)	**99**
Халид Таравнех **Ибрахим Раба** **Мохамад Навасрех** **Халил Ибрахим** **Хани Ал Навафлех**	Характеризиране на зеолитен туф от североизточна Йордания чрез използването на данни от сондажи	**105**
Диан Вангелов **Мирослава Павлова** **Янко Герджиков** **Александър Кунов**	Тимошкия разлом и терциерна отседна тектоника в част от западна България	**112**
Венелин Желев **Георги Айданлийски** **Иван Петров**	Разсипно злато в еоценски седименти от източния Балкан и Предбалкан	**118**
Тодор Ламбев **Любомир Димитров**	Първи цифров модел на морското дъно на южнобългарското черноморско крайбрежие - широк бургаски залив	**124**

Раздел 2 – Геофизика, хидрогеология и инженерна геология, сондиране и добив на нефт и газ

Стефан Димовски **Николай Стоянов**	Геоелектричен подход при търсене на окарстени зони и перспективни участъци за изграждане на вододобивни сондажи	**129**
Мая Григорова	Повишаване разрешаващата способност на сеизмограмите за извършване на скоростен анализ при обработката на сухоземни сеизмични данни	**135**
Мая Григорова	Пасивна сеизмика за целите на търсене и проучване на въглеводороди	**140**
Николай Тонев Стоянов	Хидрогеоложки модел на влиянието на река Дунав върху нивото на подземните води и възможно наводняване на проектния блок-7 на АЕЦ „Козлодуй“	**145**
Николай Стоянов **Стефан Димовски**	Модели на замърсяването на карстовия водоносен хоризонт от старото и новото депо за битови отпадъци на град Пазарджик	**151**

Янко Иванов **Атанас Кисьов** **Бойко Рангелов**	Кинематичен модел на системи за ранно предупреждение (земетресения и цунами) в Азербайджан (на примера на Баку)	**157**
Атанас Кисьов	Основни дейности прилагани в процеса за разпознаване на образи при решаване на прогнозни геоложки задачи	**163**
Янко Иванов **Атанас Кисьов**	Геофизичен подход за мониторинг на солния клин в крайбрежните зони	**168**
Ради Радичев **Емил Михайлов** **Димитър Димитров** **Християн Цанков**	Многогодишни гравиметрични измервания на Крупнишкия полигон	**174**
Ради Радичев **Емил Михайлов**	Историческа справка за метрологичното обезпечаване на статичните гравиметри използвани от геофизици и геодезисти в България	**179**
Християн Цанков **Иван Парушев**	Приложимост на любителски дистанционно управляеми летателни системи (ДУЛС) за решаване на приложни задачи	**183**
Катерина Николова **Анатолий Ангелов** **Светлана Браткова** **Петя Генова**	Установяване на влиянието на вида на анода върху работата на МГК с медиатор сероводород	**188**
Деница Борисова **Бануш Банушев** **Христо Николов** **Дойно Петков**	Идентификация на скали в открити мини по инфрачервени спектрални данни	**192**
Калинка Величкова **Дора Крежова** **Светла Манева**	Спектрометрични измервания на отразена радиация за целите на екологията	**196**
Ефросима Занева-Добранова **Лъчезар Георгиев**	Преглед на съвременните подходи за лабораторно определяне на резервоарните свойства на плътни скали-колектори	**202**
Дина А. Султанова **Дмитрий В. Мардашов** **Радмир Р. Хусаинов**	Оценка эффективности ингибиторов коррозии в условиях совместного применения с ингибиторами солеотложений	**206**
Антонио Лаков **Стефчо Стойнев**	Геотехнически условия на тунел „Железница“ от АМ „Струма“	**209**
Стефчо Стойнев **Антонио Лаков**	Геодинамично състояние на свлачището в село Плетена, община Сатовча, България	**215**

C O N T E N T S

Part 1 – Geology, Mineralogy and Mineral Deposits

Jordan Kortenski **Alexandar Zdravkov**	Major elements in coals from Gotse Delchev basin, Bulgaria	**9**
Dimitar Petrov	Laser "Raman" spectroscopy and LA-ICP-MS analysis of copper-bearing pyrite and sphalerite from gold-copper deposit Chelopech	**17**
Dimitar Petrov	Native gold and telluride minerals from a deep supergene zone in the Au-Cu deposit Chelopech	**23**
Georgi Lyutov	Trace-elements in collomorph marcasite and chalcopyrite from silver-gold deposit Sedefche, Eastern Rhodopes	**29**
Georgi Lyutov	Trace-elements in sphalerite, pyrargyrite, pyrite and arsenopyrite from silver-gold deposit Sedefche, Eastern Rhodopes	**35**
Boris Valchev	Petar (Petra, Petranitsa) river cannyon between the villages Gubislav and Milanovo (Western Stara planina mountain)	**41**
Ruslan I. Kostov **Radostin Pazderov** **Lyubomir Michaylov**	Mineral composition of jasper from the Eastern Rhodopes	**47**
Dobrinka Stavrakeva **Nikoleta Tzankova**	Chemico-mineralogical characterisation of ancient slags from Rosen ore field Part 1 – Propadnala voda deposit	**55**
Nikoleta Tzankova **Dobrinka Stavrakeva** **Petar Leshtakov** **Kalin Dimitrov**	Chemico-mineralogical characterisation of ancient slags from Rosen ore field Part 2 – Korucheshme and Rosen deposits, metallurgical center "Atiya''	**61**
N. Kalutskova **D. Sinnyovsky** **N.Telnova** **N. Dronin** **D. Useinova**	Cartographic support of aspiring Geopark Belogradchik rocks	**67**
Dimitar Sinnyovsky **Natalia Kalutskova** **Nikolai Dronin** **Valentina Nikolova**	International prospects of the aspiring Geopark Belogradchik rocks	**71**
Krasimira Karsheva	Bridge modeling and hydraulic analysis with HEC-RAS at the Tundzha structural decline, in Elhovo town area	**78**
Irena Kostova	Petrography, mineralogy and geochemistry of coal from Pchelarovo deposit, the Eastern Rhodopes Part I. Petrographical and mineralogical characterization	**83**

Irena Kostova	Petrography, mineralogy and geochemistry of coal from Pchelarovo deposit, the Eastern Rhodopes Part II. Geochemical characterization	**91**
Bogdan Prodanov **Lyubomir Dimitrov**	Integrated geo-database of seabed data in front of Avren coast, Bulgarian Black sea (cape Galata – cape Ilandzhik)	**99**
Khalid Tarawneh **Ibrahim Rabba** **Mohammad Nawasreh** **Khalil Ibrahim** **Hani Al Nawafleh**	Characterization of zeolitic tuff from Northeast Jordan using boreholes data	**105**
Dian Vangelov **Miroslava Pavlova** **Ianko Gerdjikov** **Alexandre Kounov**	Timok fault and tertiary strike-slip tectonics in part of Western Bulgaria	**112**
Venelin Jhelev **George Ajdanlijsky** **Ivan Petrov**	Placer gold in eocene sediments of Eastern Balkan and Forebalkan	**118**
Todor Lambev **Lyubomir Dimitrov**	First digital terrain model of the seabed of South Bulgarian Black sea coast - broad Bourgas bay	**124**

Part 2 – Geophysics, Hydrogeology and Engineering Geology, Drilling and Oil and Gas Production

Stefan Dimovski **Nikolay Stoyanov**	A geoelectrical approach for searching karst areas and promising sites for construction of water wells	**129**
Maya Grigorova	High resolution velocity analysis in seismic data processing	**135**
Maya Grigorova	Passive seismic in hydrocarbon exploration	**140**
Nikolay Tonev Stoyanov	Hydrogeological model of the Danube river influence over the groundwater level and the possible flooding of the suggested for construction block 7 of NPP "Kozloduy"	**145**
Nikolay Stoyanov **Stefan Dimovski**	Models of contamination in the karst aquifer caused by the old and the new landfill of Pazardzhik	**151**
Yanko Ivanov **Atanas Kisyov** **Boyko Ranguelov**	Kinematic models and early warning systems (earthquakes and tsunamis) for Azerbaidjan (Baku case)	**157**
Atanas Kisyov	Main activities applied in the process of pattern recognition used for solving prognostication geological tasks	**163**
Yanko Ivanov **Atanas Kisyov**	Geophysical approach for monitoring saltwater intrusion in coastal aquifers	**168**

Radi Radichev **Emil Mihaylov** **Dimitar Dimitrov** **Christian Tzankov**	Long-standing gravimetric measurements of the Krupnik polygon	**174**
Radi Radichev **Emil Mihaylov**	Historical overview of the metrological maintenance of static gravimeters used by the Bulgarian geophysicists and geodesists	**179**
Christian Tzankov **Ivan Parushev**	Application of non-professional remotely piloted aircraft systems (RPAS) for solving practical problems	**183**
Katerina Nikolova **Anatoliy Angelov** **Svetlana Bratkova** **Petia Genova**	Establishment the impact of anodic type on the performance of MFC with H_2S as a mediator	**188**
Denitsa Borisova **Banush Banushev** **Hristo Nikolov** **Doyno Petkov**	Identification of exposed rocks in open pit mines using infrared spectral data	**192**
Kalinka Velichkova **Dora Krezhova** **Svetla Maneva**	Spectrometric measurements of reflected radiation in ecology research	**196**
Efrosima Zaneva-Dobranova **Lachezar Georgiev**	Review of the modern approaches for laboratory assessment of the reservoir properties of solid rocks-collectors	**202**
Dina Sultanova **Dmitry Mardashov** **Radmir Khusainov**	Evaluation of the effectiveness of corrosion inhibitors in conditions of joint use of inhibitors of scaling	**206**
Anotnio Lakov **Stefcho Stoynev**	Geotechnical conditions of Jeleznica tunnel from Struma Highway	**209**
Stefcho Stoynev **Anotnio Lakov**	Geotechnical conditions of the landslide in Pletena village, Satovcha municipality, Bulgaria	**215**

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, part I, Geology and Geophysics, 2016

ПЕПЕЛООБРАЗУВАЩИ ЕЛЕМЕНТИ ВЪВ ВЪГЛИЩА ОТ ГОЦЕДЕЛЧЕВСКИЯ БАСЕЙН, БЪЛГАРИЯ

Йордан Кортенски, Александър Здравков

Минно-геоложки университет "Св. Ив. Рилски", София 1700, България; jordan_kortenski@abv.bg, alexzdravkov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Опробвани са лигнитни пластове от Гоцеделчевския басейн, който е част от Струмско-Местенската въглищна провинция, ситуирана в югозападна България. С изключение на Ti и P, съдържанието на главните елементи във въглищата е по-високо от средното за света по Valkocic (1983). Във въглищните глини надкларкови са концентрациите само на S, Ca, Mg и Al. Последните три елемента са с най-високи съдържания в изследваните въглища в сравнение с останалите въглища от Струмско-Местенската въглищна провинция. Това е резултат на грунтово подхранване от мраморите и доломитизираните мрамори на Добстанската свита от запад и на повърхностно подхранване от гнайсите на Бойковската и Бачковската свити, които изграждат част от бреговата ивица на басейна от изток. Преобладаващ органичен афинитет проявяват Ca, S, Fe, Mg, Mn, Na и P, докато Si, Al, Ti и K са с преобладаващ неорганичен афинитет. Чрез диаграма на киселинността на средата е определена стойността на pH, която варира в широки граници – от 3,5 до 6,5, средно около 5. Изчисленият индекс на подхранване на торфеното блато (SI) определя смесено подхранване, като в отделни етапи от развитието на блатото преобладава грунтовото или повърхностното подхранване.

Ключови думи: *лигнити*, пепелообразуващи елементи, органичен и неорганичен афинитет, киселинност на средата, индекс на подхранване, Гоцеделчевски басейн.

MAJOR ELEMENTS IN COALS FROM GOTSE DELCHEV BASIN, BULGARIA

Jordan Kortenski, Alexandar Zdravkov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, Bulgaria; jordan_kortenski@abv.bg, alexzdravkov@abv.bg

ABSTRACT. Lignite seams from Gotse Delchev Basin, which belongs to the Struma-Mesta Coal Province from south-western Bulgaria, were sampled. With the exception of Tiand P, the concentration of the other major elements in the studied samples is higher than the World average values (Valkocic, 1983). Within the carbonaceous shale samples S, Ca, Mg and Al contents are higher than the Clarke values. Moreover, Ca, Mg and Al show the highest concentrations among the coals from the whole Struma-Mesta Province. This is interpreted as a result of the active groundwater supply of Ca and Mg from the marbles and dolomitic marbles of the Dobrostan Formation, which occupy significant areas from the Basin's western margin. In addition, intensive siliciclastic supply from the Boikovo and Bachkovo Formations gneisses, which compose parts of the eastern margin of the coal basin, is the most probable reason for the significantly elevated Al concentrations. Calcium, S, Fe,Mg, Mn,Na and P show predominantly organic affinity, whereas Si, Al, Ti and K are mostly inorganically bound. The environmental acidity (pH) during peat formation is determined on a pH diagram. The results indicate that peat accumulation processed in acidic settings with pH in the range between 3.5 and 6.5 (average ~5). The calculated Supply Index (SI) indicates mixed groundwater/surface inorganic supply, with the former or latter predominating in particular stages of basin development.

Keywords: lignites, major elements, organic and inorganic affinity, environmental acidity, supply index, Gotse Delchev basin.

Въведение

Гоцеделчевският въглищен басейн се намира в Югозападна България. Той е част от Струмско-Местенската въглищна провинция, в която въглеобразуването е свързано с Неогенския период. Петрографски изследвания на въглищата от басейна са проведени от Шишков (1988), Кортенски, Здравков (2010), Kortenski, Zdravkov (2011). Eskenazy, Stefanova (2007) описват елементите-примеси и някои пепелообразуващи елементи и тяхното разпределение. Целта на настоящата работа е да се определи съдържанието и разпределението на пепелообразуващите елементи в лигнитите от Гоцеделчевския басейн, а чрез тях и параметрите на средата в древното торфено блато.

Кратки бележки за геологията на Гоцеделчевския въглищен басейн

Литостратиграфия

В района на басейна основно са представени скали с докамбрийска възраст, които са поделени в 6 литостратиграфски единици, обединени на представената в работата геоложка карта (фиг. 1): *Богутевска плагиогнайсова свита.* Изградена е от долнопротерозойски биотитови, по-рядко мусковит-биотитови и амфиболови гнайси с лещи от мрамори, с дебелина от 600 до 800m (Кожухаров, Маринова, 1994); *Въчанската свита* е разпространена източно от басейна и е представена от долнопроторозойски биотитови, амфибол-биотитови, двуслюдени и амфиболови гнайси, лептинити, амфиболити,

мрамори, гнайсошисти и шисти с дебелина около 700-900m (Кожухаров, Маринова, 1994); *Бойковска свита* – представена е в североизточната и южната част на разглеждания район. В състава на свитата влизат двуслюдени и биотитови гнайси, с дебелината до 800m (Кожухаров, Маринова, 1994); *Бачковска свита* – заедно с Бойковската свита изгражда значителни площи от бреговата ивица на Гоцеделчевския басейн от изток-североизток. Изградена от мусковитови, биотитови и двуслюдени лептинити с дебелина до 900m (Кожухаров, Маринова, 1994); *Луковишка гнайсошистова и шистова свита* с дебелина от 500 m включва разнообразни гнайси, гнайсошисти и шисти, мрамори и амфиболити, разкриващи се на места западно от въглищния басейн, сред скалите от Добростанската свита (Кожухаров, Маринова, 1994); *Добростанска мраморна свита*, изградена от мрамори и доломитни мрамори, прослоени от калкошисти, гнайсошисти и амфиболити с дебелина до 1000 m и Къснопротерозойска-Рифейска възраст (Кожухаров, Маринова, 1994). Свитата е широко разпространена в района, като изгражда западната брегова ивица на неогенския басейн.

Описаните докамбрийски високометаморфни скали са пресечени от горнокреден (?) интрузивен комплекс (фиг. 1; Кожухаров, Маринова, 1994), който в района е представен от биотитови гранити с преход към амфибол-биотитови гранити и гранодиорити (Тешовски плутон) западно от Гоцеделчевския басейн и биотитови до мусковитови гранити (Долнодряновски плутон) на изток.

Палеогенските скали в района на Гоцеделчевския басейн (фиг. 1) са представени от *долна брекчоконгло-мератна задруга* (горноеоценски конгломерати, брекчо-конгломерати, изклинващи пластове от пясъчници с дебелина до 1000m) и *вулканогенно-седиментен комплекс*, изграден от горноеоценски до средноолигоценски конгломерати с прослойки от аркозни пясъчници, алевролити и въглища, туфи, туфити и туфозни пясъчници и вулканити (трахириодацити, трахидацити, риодацити и дацити) (Кожухаров, Маринова, 1994).

Въгленосните неозойски скали са поделени от Вацев (1980) на три свити: *Валевишка свита*, изградена от валунни конгломерати с брекчоконгломератни прослойки и едро- до дребнозърнести пясъчници с обща дебелина до 100 m (фиг. 1). Възрастта й е определена като понт-дакска (Вацев, 1980*). Балдевска свита* - средно- до дребнокъсови конгломерати, пясъчници, алевролити, глини, диатомити и въглища. Въглищните пластове са привързани към долната и горната част на свитата и са до 14 на брой. Общата дебелина на наслагите е 100-250 m (фиг. 1). Възрастта на свитата е понт-дакска (Вацев, 1980). *Неврокопската свита* е изградена от разнокъсови конгломерати, от дребно- до грубозърнести пясъчници с про-слойки от дребнокъсови конгломерати и брекчоконгломерати, алевролити и песъчливи глини (фиг. 1) с плиоценска (романска) възраст (Вацев, 1980). Дебелината й варира от 50-100 до 300 m.

Кватернерните образувания са представени преди всичко от пролувиални и алувиални седименти. Последните имат значително развитие по долините на р. Места. Представени са от чакъли, валуни и разнозърнести пясъци с дебелина до 28m. Те са руслови, от заливните тераси и от I и II надзаливни тераси (Кожухаров, Маринова, 1994). Пролувиалните образувания са засебени като наносни конуси в периферията на котловините.

Тектонски строеж на басейна

Въгленосният неоген е отложен в южната част на Местенския грабен, който е оформен от разломите на Местенската разломна зона с посока 280-290 до 300-330° (фиг. 1). По-големи разломи в района са: Огняновски (разделя скалите на Балдевската свита от тези на Бойковската); Гърменски (разделя Балдевската от Неврокопската свита); Вълкоселски; Блатски; Бесленски (Кожухаров, Маринова, 1994).

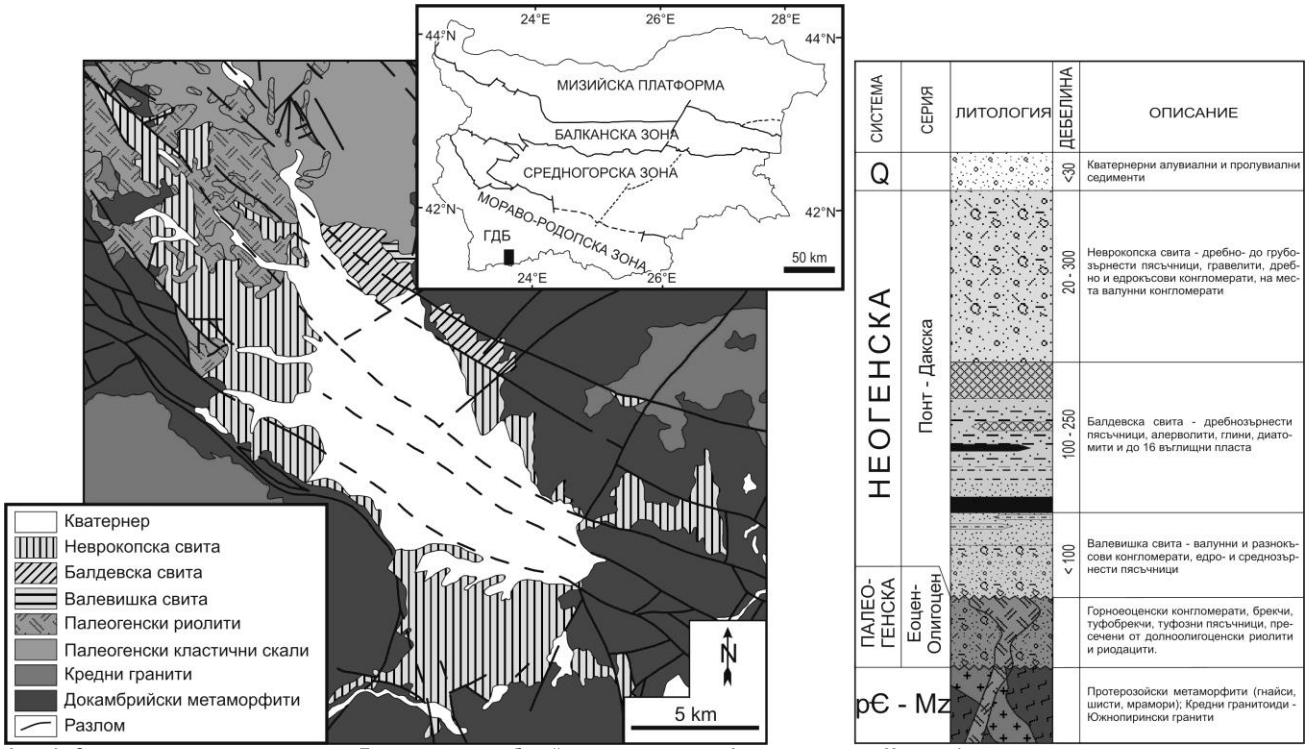
Материал и методика на изследване

Въглищата от Гоцеделчевския басейн са опробвани браздово в 27 забоя. Пробите за химичните анализи на въглища са стрити до размери <250 μm в Лабораторията по органична петрология към катедра "Геология и проучване на полезни изкопаеми". За установяване на геохимичната им характеристика, въглищата са опепелени при температура от 800°C в ЦНИЛ „Геохимия". Главните елементи, изграждащи пепелта на въглищата и въглищните глини са определени чрез силикатен анализ, съгласно стандарт ISO 11535-2002. За целта пепелта е приведена в разтворено състояние чрез третиране с азотна киселина, след което полученият разтвор (0,1-250ml) е анализиран на спектрален анализатор ICP-VISTA-MPX SIMULTANEOUS CCD. Количественото определя-не на съответните оксиди е направено със стандартни вещества. Резултатите са обработени на персонален компютър като е извършен йерархичен клъстер анализ по средно претегления метод с програма STATISTICA ModuleSwitcher.

Резултати и обсъждане

Съдържание на пепелообразуващите елементи в гоцеделчевските въглища

Във въглищната пепел с най-високо средно съдържание е SiO_2, значително е и количеството на оксидите на Al, Ca, Fe и S (табл. 1). Най-ниско е съдържанието на MnO и P_2O_5 в пепелта и на въглищата, и на въглищните глини. В пепелта на последните с най-висока концентрация са SiO_2 и Al_2O_3 (табл.



Фиг. 1. Схематична геоложка карта на Гоцеделчевския басейн с литостратиграфска колонка на Неозоя (на основата на геоложката карта на България, М 1:100 000 - Кожухаров, Маринова, 1994)

Таблица 1

Съдържание на оксидите на пепелообразуващите елементи в пепелта на гоцеделчевските въглища

Оксиди	Средно съдържание (wt,%) в пепелта на		В/ВГ	Коефициент на корелация с пепелта
	въглища (В)	въглищни глини (ВГ)		
Si_2O	32,20	51,70	0,6	+0,85
Fe_2O_3	13,60	5,10	2,7	-0,73
TiO_2	0,38	0,55	0,7	+0,80
Al_2O_3	18,80	27,50	0,7	+0,80
MnO	0,26	0,06	4,3	-0,79
CaO	18,10	4,80	3,8	-0,80
MgO	4,90	4,20	1,2	-0,34
Na_2O	0,46	0,06	7,7	-0,69
K_2O	0,84	1,16	0,7	+0,51
P_2O_5	0,11	0,06	1,8	-0,34
SO_3	10,20	4,50	2,3	-0,60
A^d	18,65	52,40		

1). По време на торфогенезата подхранването явно е било, както повърхностно с теригенен материал, така и грунтово, докато при отлагането на материала за образуване на въглищните глини е доминирало повърхностното подхранване с теригенен материал. Съдържанието на елементите във въглищата надвишава средното за света за почти всички елементи с изключение на Ti и P, при които е околокларково (табл. 2). В таблица 3 е направено сравнение на концентрацията на елементите във въглищната пепел на Гоцеделчевския басейн с тази от други басейни от Струмско-Местенската въглищна провинция.

Таблица 2

Съдържание на пепелообразуващите елементи в гоцеделчевските въглища и тяхната пепел

Елемент	Средно съдържание (wt,%) в пепелта на		Кларк за глини[1] (wt,%)	Средно съдържание (wt,%) във въглища	Средно за света[2] (wt,%)
	въглища	въглищни глини			
Si	15,04	24,14	26,9	5,36	2,8
Fe	9,52	3,57	4,72	1,78	1,0
Ti	0,23	0,33	0,46	0,04	0,05
Al	9,96	14,58	8,0	1,86	1,0
Mn	0,20	0,05	0,085	0,04	0,01[3]
Ca	12,92	3,43	0,94	2,41	1,01
Mg	2,94	2,52	0,60	0,91	0,02
Na	0,34	0,04	0,96	0,06	0,02
K	0,70	0,96	2,66	0,13	0,01
P	0,05	0,03	0,07	0,01	0,013[3]
S	4,08	1,80	0,24	0,76	н.д.

1 – по Turikian and Wederpohl (1961); 2 – по Valkovic (1983); 3 – по Ketris and Yudovich (2009).

Количеството на Al, Ca, Mn и Mg е най-голямо в изследваната въглищна пепел. Прави впечатление, че същите елементи без Mn са с надкларкови съдържания и в пепелта на въглищните глини (табл. 2), което показва един и същ източник на подхранване на торфеното блато по време на торфогенезата и при отлагане на глинестите прослойки. За Ca и Mg най-вероятно този източник са мраморите от Добростанската мраморна свита от запад, а за Al – гнайсите на Бойковската и Бачковската свити от изток. Количеството на P и Na е най-малко както в пепелта на въглищата в сравнение с останалите от Струмско-

Местенската провинция, така и в пепелта на въглищните глини, в сравнение с клраковото (табл. 2 и 3).

Съдържанието на останалите елементи във въглищната пепел е около средното за провинцията (табл. 3). Във въглищните глини надкларкова е и концентрацията на S, докато останалите елементи са с подкларкови количества, като това е особено значително за P и Na, както и при въглищната пепел (табл. 2).

Таблица 3
Съдържание на пепелообразуващите елементи в пепелта на въглища от Струмско-Местенската провинция

Елемент	Средно съдържание (wt,%) в пепелта на въглища от			
	Гоце Делчев	Кюстендил[1]	Ораново[1]	Катрище[1]
Si	15,04	12,20	7,50	19,00
Fe	9,52	13,80	6,52	29,60
Ti	0,23	0,21	0,26	0,29
Al	9,96	8,30	2,77	6,08
Mn	0,20	0,04	0,08	0,06
Ca	12,92	2,80	1,90	2,00
Mg	2,94	2,50	2,40	0,90
Na	0,34	2,15	1,98	0,45
K	0,70	0,92	0,61	0,07
P	0,05	0,24	0,32	0,08
S	4,08	3,90	10,0	0,74

1 – данни на Кортенски (2011).

Привързаност на пепелообразуващите елементи към органичното вещество на въглищата

Елементи с преобладаваща привързаност към органичното вещество (преобладаващ органичен афинитет)

В изследваните въглища такива са Fe, Ca, S, Mg, Mn, Na и P. Техните концентрации са по-високи в пепелта на въглищата от тези в пепелта на въглищните глини (В/ВГ>1,1) и коефициентите им на корелация с пепелното съдържание са отрицателни (табл. 1). Количеството им намалява с увеличаване на пепелността на въглищата (фиг. 2).

Желязо. Eskenazy, Stefanova (2007) установяват 2 пъти по-ниско съдържание на Fe в гоцеделчевските въглища. Органичната форма на елемента е преобладаваща, предимно сорбционна, която според Войткевич и др. (1983), е като комплексни метало-органични съединения. Макар и с не особено високо съдържание, Fe присъства в растителните останки (средно около 0,014% по данни на Bowen, 1966), така че е възможна и биогенна органична форма. Минералната форма на Fe е свързана предимно със сулфиди и най-вече пирит. Наблюдава се положителна корелация на елемента със сярата (фиг. 2,з), която се обуславя най-вероятно именно на пирита, но е възможно и на присъствието на сулфати. Освен това Fe може да се среща под формата и на карбонати, тъй като положителният коефициент на корелация със сярата не е с много висока стойност.

Калций. Концентрацията на Ca намалява с нарастване на пепелното съдържание на въглищата (фиг. 2,а), поради което коефициентът му на корелация с пепелта е отрицателен, с висока стойност (табл.1). Органичната форма на Ca е биогенна и сорбционна. Последната е свързана с хумати и фулвати (Войткевич и др., 1983). Биогенната му форма на присъствие е много вероятна, тъй като съдържанието на елемента в растенията е 1,8% (Bowen, 1966). Възможна е и минерална форма на присъствие на Ca, но количеството в изследваните въглища не е голямо. Тя е свързана предимно със собствени карбонатни и сулфатни минерали.

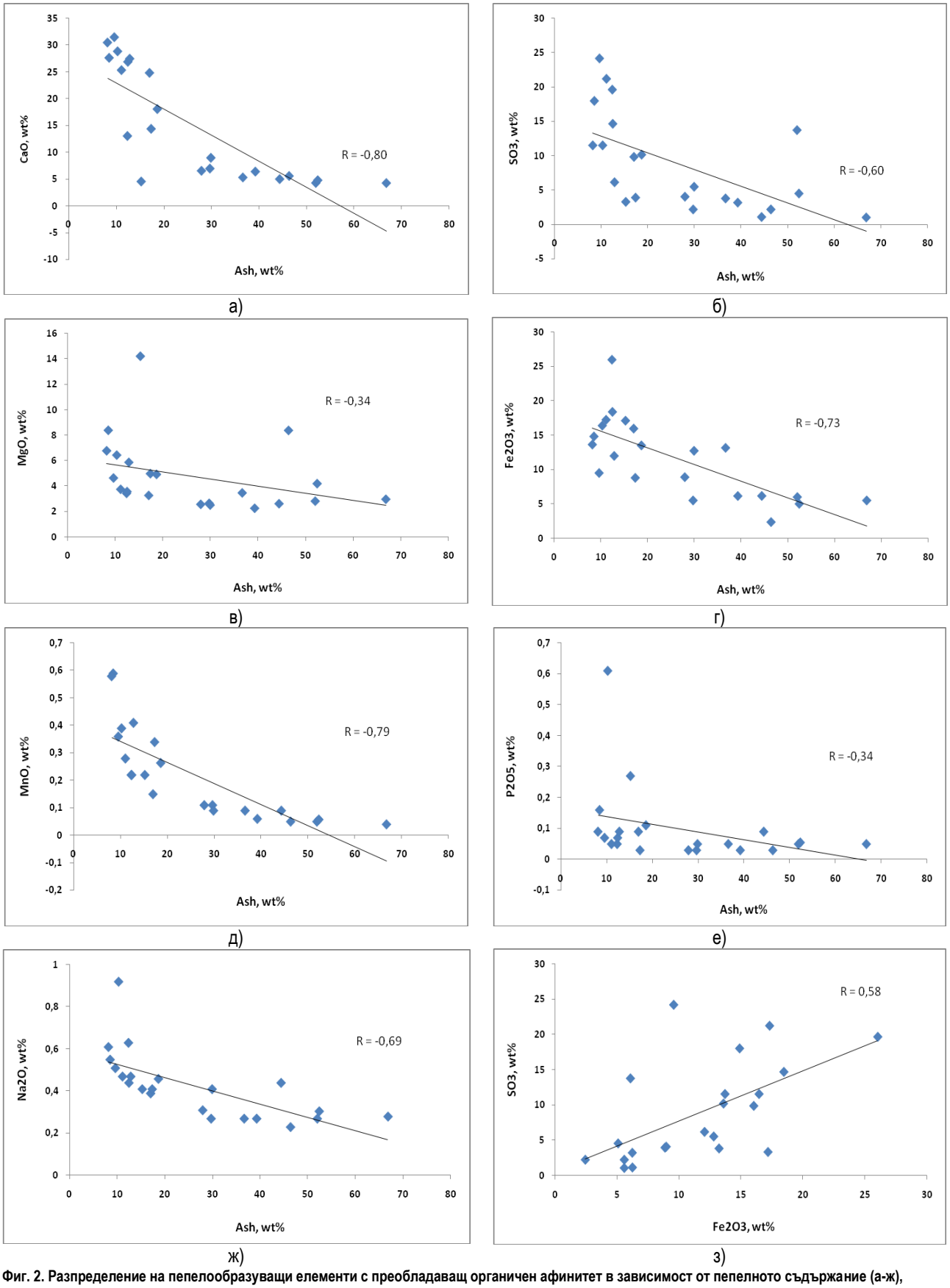
Магнезий. Концентрацията на Mg намалява с нарастване на пепелното съдържание на въглищата (фиг. 2,в). Съдържанието му в растенията е 0,32% (Bowen, 1966), поради което е възможна биогенна форма. Сорбционната форма, подобно на Ca, е свързана с хумати и фулвати (Войткевич и др., 1983). Минералната форма на Mg е свързана предимно с карбонати.

Сяра. Киселата среда в торфеното блато е причина сярата да се фиксира предимно в органичното вещество. Според Given and Wysse (1961) тиолите, тиофените и тиопироните са основни органични форми на сярата във въглищата. Твърде е възможна и биогенна форма, тъй като съдържанието на елемента в растителна пепел е 5% (Войткевич и др., 1983). Минералната форма на S е свързана предимно с пирита, на което се дължи положителната корелация с Fe (фиг. 2,з). Част от количеството й може да се дължи и на сулфатите.

Манган. Eskenazy, Stefanova (2007) установяват близко до изложеното в таблица 2 съдържание на елемента в гоцеделчевските въглища. Концентрацията на Mn намалява с увеличаване на пепелното съдържание (фиг. 2е). Органичната му форма е като комплексни метало-органични съединения, докато минералната е свързана най-често с карбонатите и количеството й не е голямо.

Натрий. Eskenazy, Stefanova (2007) установяват близо 2 пъти по-високо съдържание на Na в гоцеделчевските въглища. На фигура 2,ж се вижда, че с увеличаване на пепелността, намалява концентрацията на Na, която е подкларкова във въглищните глини и надкларкова, макар и не висока във въглищата (табл. 1). Доминиращата органична форма е свързана предимно с хумати и фулвати, които според Войткевич и др. (1983), са типичната сорбционна форма на присъствие за Na.

Част от органичната форма на присъствие може да бъде биогенна, тъй като съдържанието на Na в растения на суха маса е 0,12% (Bowen, 1966). Минералната форма на Na може да бъде свързана с глинестите минерали или други силикати.



Фиг. 2. Разпределение на пепелообразващи елементи с преобладаващ органичен афинитет в зависимост от пепелното съдържание (а-ж), зависимост между съдържанията на Fe и S (з)

Фосфор. Eskenazy, Stefanova (2007) съобщават за подобно на установеното в настоящата работа съдържание на P в гоцеделчевските въглища. Концентрацията на елемента намалява с увеличаване на пепелността (фиг. 2,е). Органичната форма на P може да бъде биогенна и сорбционна. Според Юдович и др. (1985) сорбционната форма на P е свързана със сорбционната форма на Fe, Ca или Mg. Биогенната форма на елемента е възможна, тъй

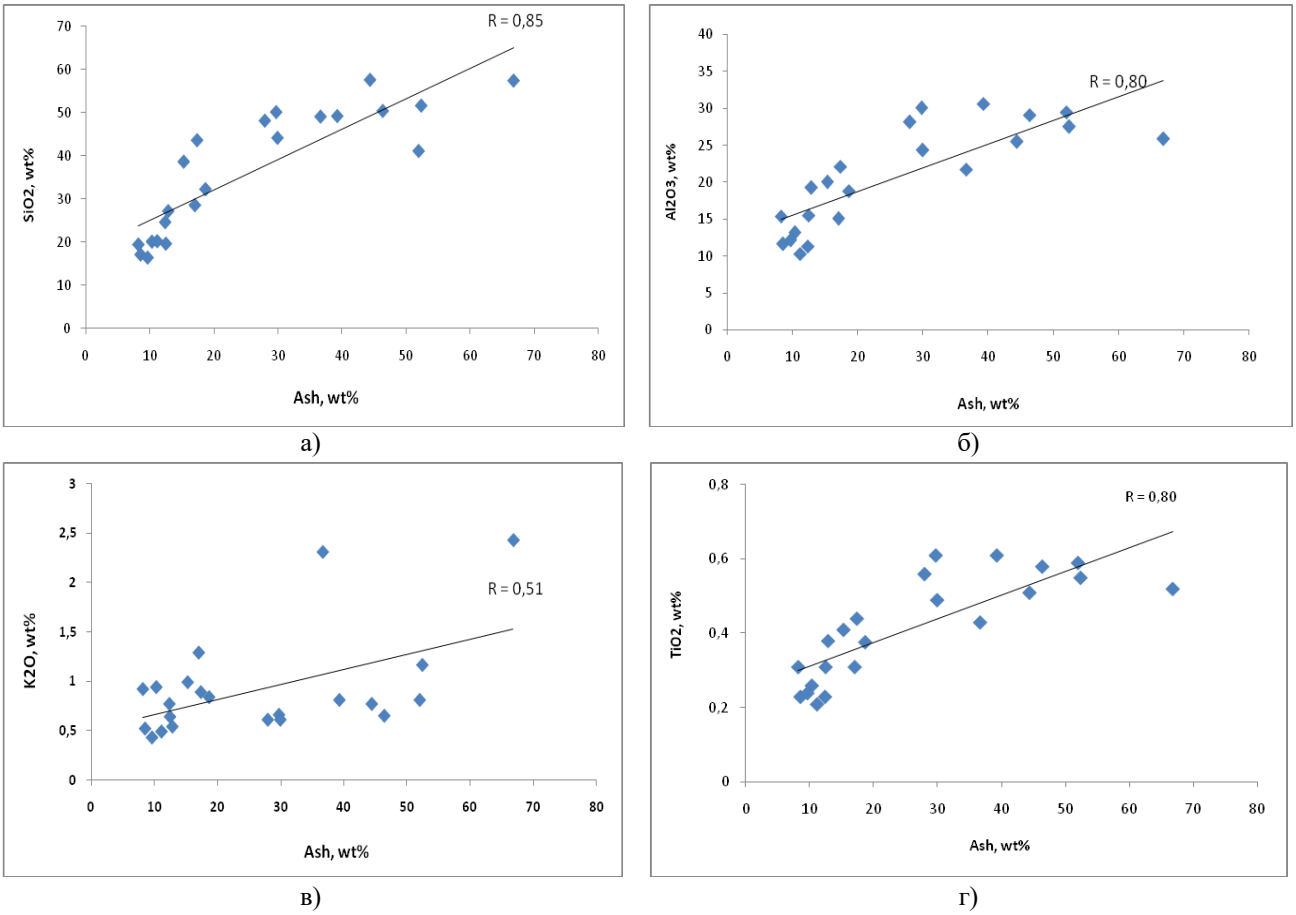
като той се съдържа в белтъчните съединения на растенията. Минералната форма най-често е свързана с глинестите минерали. Възможни са и собствени минерали като апатит, фосфорит и др.

Елементи с преобладаваща привързаност към неорганичното вещество (преобладаващ неорганичен афинитет)

В изследваните въглища в тази група попадат Si, Al, Ti и K. Техните концентрации са по-високи в пепелта на въглищните глини от тези в пепелта на въглищата (В/ВГ<0,9) и коефициентите им на корелация с пепелното съдържание са положителни (табл. 1).

Силиций. Съдържанието на Si във въглищата надвишава близо 2 пъти средното за света, докато във въглищните глини е незначително подкларково (табл. 2). Както в почти всички въглища, така и в гоцеделчевските, Si е с преобладаващ неорганичен афинитет и съдържанието му нараства с увеличаване на пепелността (фиг. 3,а). Това обуславя и положителният му коефициент на корелация с нея. Преобладаващата му минерална форма е свързана предимно с глинестите минерали, но е възможно с теригенния материал да постъпва кварц и други силикати. Според Юдович и Кетрис (2002) органичните киселини в торфеното блато могат да извличат от глинестите минерали Si и по този начин да се образуват комплекси на Si с хумусните киселини, най-вероятно хелати.

Алуминий. Съдържанието му във въглищата е малко по-високо от средното за света, а във въглищните глини е подкларково (табл. 2). Коефициентът на корелация с пепелното съдържание е положителен (табл.1, фиг. 2, б). Минералната форма на присъствие е свързана предимно с глинести минерали. Според Юдович, Кетрис (2002) е възможно свързването на Al с хумусните киселини като много устойчиви хумати или хелати.



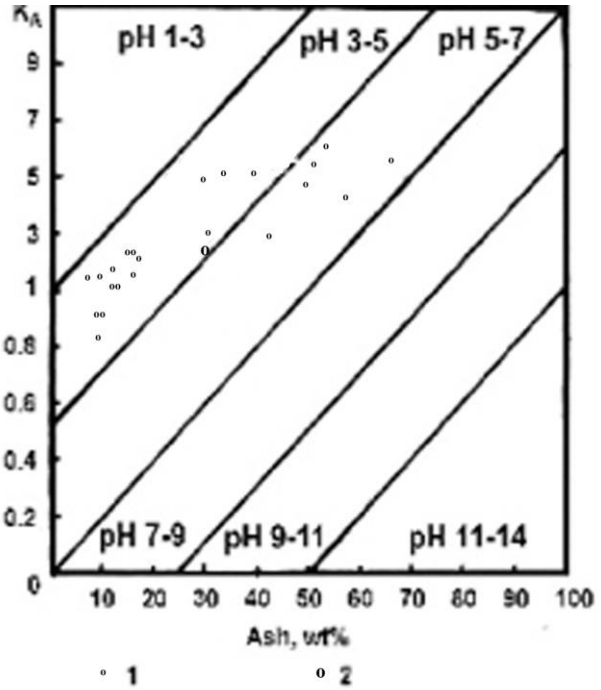
Фиг. 3. Разпределение на пепелообразуващи елементи с преобладаващ неорганичен афинитет в зависимост от пепелното съдържание

Калий. Съдържанието на елемента е близко до установеното от Eskenazy, Stefanova (2007), като авторите също определят неорганичен афинитет. На фигура 3,в се наблюдава повишаване на концентрацията на елемента с увеличаване на пепелността. Преобладаващата минералната форма на К е свързана с глинестите минерали и предимно с илита. С органичното вещество елементът може да се свързва под формата хумати или фулвати (Войткевич и др., 1983). Възможно е присъствието на биогенен К, тъй като съдържанието му в растенията е 1,4% К (Bowen, 1966).

Титан. Eskenazy, Stefanova (2007) установяват 2 пъти по-високо съдържание на Ti в гоцеделчевските въглища. Тези автори също съобщават за неорганичен афинитет на елемента. Концентрацията и на този елемент е подкларкова (табл. 2), като се увеличава с нарастване на пепелността (фиг. 3,г). Изследванията на Ескенази (1972)

доказват, че част от съдържанието на елемента е свързано с хумати, а останалата част от сорбционната му форма – с комплексни елементо-органични съединения. Минералната форма на Ti в изследваните въглища е свързана предимно с рутил, титанит и глинестите минерали.

Киселинност на средата в торфеното блато

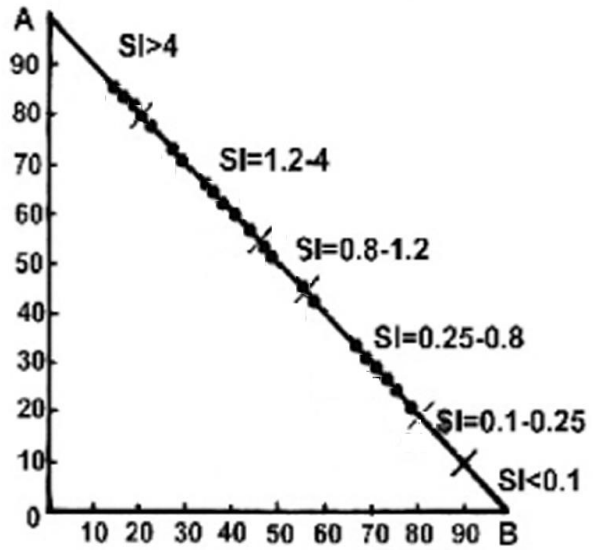


Фиг. 4. Диаграма на киселинността на средата.
1 – стойности за отделна проба; 2 – средна стойност за торфеното блато

Киселинността на средата в древното торфено блато е определена чрез химичния състав на въглищната пепел на диаграмата на киселинността по Кортенски (1986). От разположението на точките върху диаграмата на киселинността на средата (фиг. 4) се вижда, че стойностите на Ph варират в широки граници в различните етапи от развитието на торфеното блато. Когато е преобладавало грунтово подхранване от мраморите на Добростанската свита е намалявала киселинността. Стойностите на pH от порядъка на 3,5-4,0 са свързани с етапи, в които е преобладавало повърхностно подхранване при незначително постъпление на подземни води.

Подхранване на древното торфено блато

Обикновено Si, Al и Ti постъпват в торфеното блато с теригенен материал, а Ca, Mg, Fe, S, Mn, Na, K и P се пренасят предимно в разтворено състояние. Повишеното съдържание във въглищата на първите 3 елемента означава, че постъплението на теригенен материал е преобладаващо. Обратното, високата концентрация на Ca, Mg, Fe, S, Mn, K, Na и P може да се използва като белег за преобладаващо грунтово подхранване Според Кортенски (2011) чрез съотношението на оксидите на двете групи елементи може да се определи индекс на подхранване на торфеното блато. На фигура 5 се вижда, че малка част от пробите попадат на диаграмата в зоната със съизмеримо грунтово и повърхностно подхранване (SI = 0,8 до 1,2). Голяма част от пробите характеризират смесено подхранване с преобладаване на повърхностно (SI = 1,2 до 4) или на грунтово подхранване (SI = 0,25 до 0,8). Малко от пробите попадат в зоната със стойност на SI > 4, което означава, че торфонатрупването е ставало при почти изцяло повърхностно подхранване, което, както е отбелязано по-горе, се е осъществявало от гнайсите на Бачковската и Бойковската свити от изток.



Фиг. 5. Диаграма за определяне на индекса на подхранване (SI) на торфеното блато (Кортенски, 2011).
$A=SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$, %;
$B=CaO+MgO+Fe_2O_3+SO_3+K_2O+Na_2O+MnO+P_2O_5$, %

Заключение

С извършените анализи са установени 11 елемента. Съдържанието им във въглищата надвишава средното за света за почти всички с изключение на Ti и P, при които е околокларково. В пепелта на въглищата количеството на Al, Ca, Mn и Mg е най-голямо в сравнение с тези от други басейни от Струмско-Местенската въглищна провинция. Същите елементи без Mn са с надкларкови съдържания и в пепелта на въглищните глини, което свидетелства за един и същ източник на подхранване на торфеното блато по време на торфогенезата и при отлагане на глинестите прослойки. За Ca и Mg най-вероятно този източник са мраморите от Добростанската мраморна свита от запад, а за Al – гнайсите на Бойковската и Бачковската свити от изток.

В изследваните въглища Fe, Ca, S, Mg, Mn, Na и P са с преобладаваща привързаност към органичното вещество (преобладаващ органичен афинитет), а Si, Al, Ti и K са с преобладаващ неорганичен афинитет.

Средата в торфеното блато е била от кисела до слабо кисела (pH от 3,5 до 6,5) в различните етапи от торфонатрупването. Киселинността на средата зависи от типа на подхранването на торфеното блато. Установеният тип на подхранване чрез стойността на индекса на подхранване (SI) варира за различните етапи, което определя и вариациите в стойностите на pH. Торфонатрупването се е осъществявало през по-голяма

част от времето при смесено подхранване с преобладаване на повърхностното или на грунтовото такова. Само отделни етапи от развитието на торфеното блато са протичали при съизмеримо количество на двата типа подхранване или при почти изцяло повърхностно такова.

Литература

Вацев, М. Литостратиграфия на неогенските седименти от Гоцеделчевската котловина. - *Год. ВМГИ*, *25,* 2, 1980. - 103-115.

Войткевич, Г.В., Л.Я. Кизильштейн и Ю.И. Холодков. *Роль органического вещества в концентрации металов в земной коре.* М., Недра, 1983. – 154 с.

Ескенази, Г. Некоторые аспекты геохимии титана в процессе углеобразования. - *Год. СУ, Геол.-геогр. фак., 65,* 1, 1972. - 177-199.

Кожухаров, Д., Р. Маринова. *Обяснителна записка към геоложката карта на България. М 1:100 000, Картен лист Гоце Делчев, Обаднителна записка,* С., "Геология и геофизика" АД, 1994. - 58 с.

Кортенски, Й. Определяне на минералите във въглищата от Софийския басейн чрез резултатите от силикатния анализ. - *Год. ВМГИ, 32*, 2, 1986. - 179-191.

Кортенски, Й. *Елементи-примеси и пепелообразуващи елементи в български въглища.* – С. Изд.къща „Св. Ив. Рилски", 2011. – 254 с.

Кортенски, Й., А. Здравков. Петрология на въглищата от Гоцеделчевския басейн, Югозападна България. – *Год. МГУ, 53,* 1, 2010. - 86-93.

Шишков. Г. *Теоретични основи на биохимичната въглефикация.* С., Унив. и-во "Кл. Охридски", 1988. - 181 с.

Юдович, Я.Е., М.П. Кетрис, А.Б. Мерц. 1985. *Елементы-примеси в ископаемых углях.* М., Наука, 239 с.

Юдович, Я.Е., М.П. Кетрис. *Неорганическое вещество углей. Екатерининбург,* Типогр. УрО РАН, 2002. – 421 с.

Bowen, H.L. *Trace Elements in Biogeochemistry.* N.Y. Acad. Press, London, 1966. - 235 pp.

Eskenazy, G.M., Y.S. Stefanova. Trace elements in the Goze Delchev coal deposit, Bulgaria. - *Int. J. Coal Geol*., *72,* 2007. – 257-267.

Given, P. H., W. F. Wysse. The chemistry of sulfur in coal. - *British Coal Utilization Research Association Monthly Bulletin, 25, 1961. - 165-179.*

Ketris, M.P., Ya.E. Yudovich. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. - *Int. J. Coal Geol*., 78, 2, 2009. - 135-148.

Kortenski, J., A. Zdravkov. Petrology and depositional environment of the lignite seam I from Gotse Delchev basin, South-West Bulgaria. - *Докл. БАН*, 2011. - 719-724.

Turekian, K.K., K.H. Wedepohl. Distribution of the elements in some major units of the earth`s, crust. - *Bull. Geol. Soc. of Amer.,* 72, 2, 1961. - 181-263.

Valkovic, V. *Trace elements in coal.* - CRC Press, Inc., Raton, Fla., 1, 1983. - 210 pp.

Статията е рецензирана от доц. д-р Мариана Йосифова и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и проучване на полезни изкопаеми".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

LASER "RAMAN" SPECTROSCOPY AND LA-ICP-MS ANALYSIS OF COPPER-BEARING PYRITE AND SPHALERITE FROM GOLD-COPPER DEPOSIT CHELOPECH

Dimitar Petrov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; dimitar@sitost.com

ABSTRACT. The presences of copper-bearing pyrite and sphalerite from the gold-copper deposit Chelopech are determined, by LA-ICP-MS analysis and μ-laser „Raman" spectroscopy. In polished sections of Western sector of the deposit, the quantitative LA-ICP-MS analysis are performed on zonal pyrite, which shows a varying contents of Cu, with values up to 37,000 ppm. Two types of zonal pyrite with idiomorphic octahedral and colloform texture are observed, in which the copper is a structurally bound and in the form of sub-microscopic inclusions of chalcopyrite. The studied sphalerite grain with a darker section also contains copper in the form of mineral inclusions of chalcopyrite.

Key words: „Raman" μ-spectroscopy, LA-ICP-MS analysis, element-impurities, ore minerals, Chelopech deposit

ЛАЗЕРНА „РАМАН" СПЕКТРОСКОПИЯ И LA-ICP-MS АНАЛИЗИ НА МЕД-СЪДЪРЖАЩИ ПИРИТ И СФАЛЕРИТ ОТ ЗЛАТНО-МЕДНО НАХОДИЩЕ ЧЕЛОПЕЧ

Димитър Петров
Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, dimitar@sitost.com

РЕЗЮМЕ. Чрез използването на LA-ICP-MS анализ и μ-лазерна „Раман" спектроскопия е установено присъствието на мед-съдържащи пирит и сфалерит от златно-медно находище „Челопеч". В полирани препарати от участък „Запад" на находището, са проведени количествени LA-ICP-MS анализи на зонален пирит, които показват различни съдържания на Cu със стойности до 37 000 ppm. Наблюдавани са два типа зонален пирит с идиоморфна октаедрична и коломорфна структура, в които медта е структурно свързана и под формата на субмикроскопични включения от халкопирит. Изучаваното сфалеритово зърно с по-тъмен участък, също съдържа мед под формата на минерални включения от халкопирит.

Ключови думи: „Раман" микро-спектроскопия, LA-ICP-MS анализ, елементи-включения, рудни минерали, находище Челопеч

Introduction

Pyrite is one of the main ore minerals in the main pyrite-chalcopyrite, enargite, and tennantite mineral associations in the gold-copper deposit Chelopech, which suppose relatively high correlation of Fe with the elements Cu, As, Sb, Au, Ag and Sn. Two types of zonal pyrite with idiomorphic octahedral and colloform texture in polished sections from the gold-copper deposit Chelopech are observed (Fig. 1).

The occasional presence of copper up to 10 wt. % in pyrite is reported by Frencel and Ottemann (1967); Einaudi (1968); Pačevski et al. (2008) and Petrov et al. (2013). The authors are noted zoning, weak anisotropy, and variations in color and reflectivity in pyrite grains from epithermal Cu-Zn-Pb-Ag, Cu-Zn-Pb, Cu–Au–Ag–Zn–Pb and Au-Cu type of deposits.

Optically darker areas of sphalerite grains showed higher contents of Cu and Fe, analyzed by LA-ICP-MS. The presence of copper in sphalerite has been studied by several authors (Barton and Bethke, 1987; Kant et al., 2012), who reported for micron inclusions of chalcopyrite in the form of zones in Fe-bearing sphalerite.

The aim of the present study is to determine the form of presence of the Cu in pyrite and sphalerite in polished sections from the gold-copper deposit Chelopech - which originates from submicroscopic inclusions of Cu-minerals, and which is structurally bound copper. In addition to the microscopic and LA-ICP-MS analyses, for the implementation of the intended aim was conducted laser micro-Raman spectroscopy of the observed in polished sections two types of zonal pyrite and a copper-bearing sphalerite grains.

Materials and methods

Reflected light microscopy for establishing the optical and textural characteristics of ore minerals in 10 polished sections of ore bodies of block № 149 from sector "West" in the gold-copper deposit Chelopech is used.

In order to define the chemical composition and structural features of the most common minerals like pyrite and enargite, secondary chalcopyrite and sphalerite in the ore bodies of the recent study, LA-ICP-MS analysis and laser micro-Raman spectroscopy were applied.

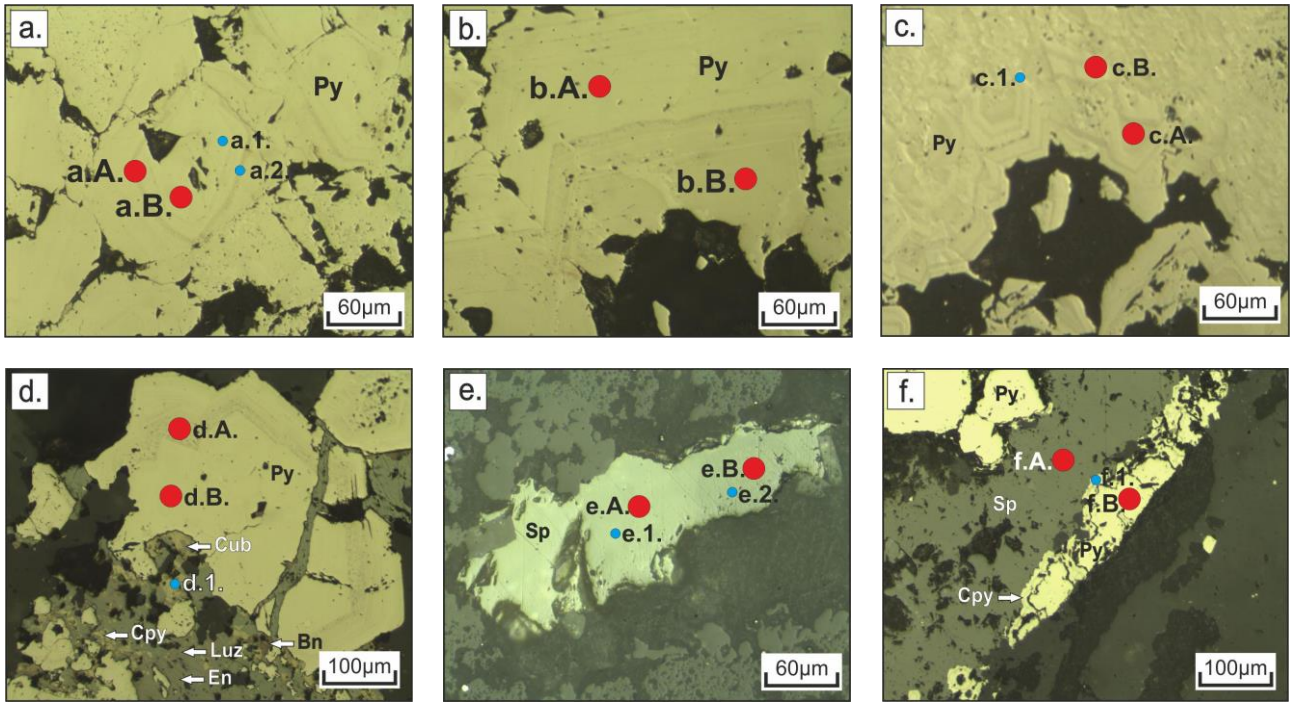


Fig. 1. Microphotos of ore minerals in polished sections from the Western sector of the gold-copper deposit Chelopech (reflected light):
a. - A zonal pyrite (Pyr) with narrow dark stripes and gangue minerals (black); b. - Massive pyrite, with alternating large dark and light areas, among gangue minerals (black); c. – A main mass of pyrite with octahedral dark and bright areas. Among the pyrite, brighter areas due to the admixing with chalcopyrite are observed; d. – Hypidiomorphic pyrite aggregate with alteration of dark and light areas of growth. The pyrite is cut by enargite (En). Nearby, a xenomorphic aggregates of chalcopyrite (Cpy), bornite (Bn), luzonite (Luz) and cubanite (Cub), among the main mass of enargite and single aggregates of pyrite are observed; e. – A sphalerite (Sp) mineral grain with a dark area, among gangue mineral mass; f. – A sphalerite among gangue matrix and a strip of colloform pyrite with darker bands of chalcopyrite.

Note: The positions of the LA-ICP-MS analyses are marked with a big point (for example – an. a.A. and a.B.), these of a micro-Raman analysis with a small point (for example – an. a.1. and a.2.).

Rare minerals bornite, luzonite and cubanite are also identified by reflected light microscopy and laser micro-Raman spectroscopy. Ore minerals in the observed polished sections are accompanied mainly by quartz, barite and kaolinite, rarely by dickite and apatite as gangue minerals.

Twelve LA-ICP-MS analyses in geochemical laboratory "Geochemistry and Petrology" at the Geological Institute of the Bulgarian Academy of Sciences are performed. The laboratory facilities include ELAN®DRC-e of Perkin Elmer with dynamic reaction cell-(DRC) and 193 nm excimer laser of New Wave Research UP193FX, at a frequency of pulsing of the laser beam of 10 Hz. External standards on glass SRM-610 from NIST is used. To transform data in absolute terms is used internal standard.

The content of the 29 elements (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Ta , W, Re, Pt, Au, Hg, Pb and Bi) is analyzed in minerals pyrite (9 analyzes) and sphalerite (3 analyzes). Copper-bearing pyrite and sphalerite grains are selected, on which is carried out a µ-laser "Raman" spectroscopy at room temperature in the Laboratory of fluid inclusions of the University of Leoben (Austria). Raman spectra were obtained with a laser "Raman" micro-spectrometer Horiba Jobin-Yvon, laser with a nominal power of 100 mW and a wavelength of 532 nm. The "Raman" device includes a microscope Olympus BX60, camera CCD CV-252, connected to a monitor for direct observation, computer system and specialized software LabSpec. The data acquisition was performed by 5x5 seconds exposure and added various filters (from D0.6 to D2), as spectra were recorded with a spectral resolution within 2 cm^{-1}.

Results and discussion

The presence of copper-bearing pyrite (up to 37 000 ppm) and sphalerite (up to 20 317 ppm) from the gold-copper deposit Chelopech, using LA-ICP-MS analysis are established (Table 1.).

Two types of pyrite can be distinguished - *type I*, with the idiomorphic octahedral texture, in which is clearly observed symmetrically alternating darker and brighter zones, measuring up to several tens of µm each, and *type II*, with a colloform shape, in which thin (about 1-2 µm) gray stripes, alternate with brighter zones of mineral grains (Fig. 1). The very small size of the stripes in pyrite of *type II* do not allow precise determination of trace elements by chemical analyses like microprobe and LA-ICP-MS analysis, but using a µ-laser "Raman" spectrometry would prove, that the differences in optical properties in stripes are due to different chemical composition. These differences are marked with the characteristic peaks of the Raman spectral waves, presented in Table 2 and Figure 2 It is assumed that the peaks at 341, 377 and 428 cm^{-1} mark the group of Fe-S, and that at 470 cm^{-1} of the Cu-S in the wavelength range of darker zones of pyrite *type I* (Fig. 1 a, an. №a.2). The brighter zones of the same mineral grain show typical "Raman" spectra of „clear" pyrite from the Chelopech deposit (Fig. 2, Table 2, an. №a.1).

Table 1.
Contents of 29 elements in pyrite and sphalerite from the gold-copper deposit Chelopech, determined by LA-ICP-MS analysis (in ppm).

Analysis	a.A.	a.B.	b.A.	b.B.	c.A.	c.B.	d.A.	d.B.	e.A.	e.B.	f.A.	f.B.
Elem./Min.	Pyrite	Pyrite	Pyrite	Pyrite	Pyrite	Pyrite	Pyrite	Pyrite	Sphalerite	Sphalerite	Sphalerite	Pyrite
Ti	14,25	17,14	795,32	4039,21	<12.19	19,25	<12.38	16,90	<6.25	17,78	9,37	50,03
V	<1.74	1,18	5,88	23,36	<2.08	<0.43361	16,03	2,31	1,30	<0.79	<0.61	6,09
Cr	63,37	56,15	47,04	49,38	63,33	42,35	47,03	56,85	<7.86	<6.69	<8.58	47,88
Mn	60,91	111,69	116,51	96,98	60,02	52,47	3738,05	305,17	11,18	1712,58	2,06	80,86
Fe	441600,00	441600,00	459900,00	459900,00	429500,00	429500,00	442700,00	442700,00	255,02	17106,65	183,99	465500,00
Co	10,41	2,18	205,28	305,75	3,72	15,91	0,60	2,05	<0.25	<0.28	<0.19	29,79
Ni	16,72	7,78	9,33	15,12	16,34	37,49	14,34	6,02	<1.89	10,30	<2.20	4,61
Cu	18762,05	3611,93	1150,39	11356,34	23248,21	37080,28	19197,72	8045,23	1723,13	20317,57	245,14	413,77
Zn	57,03	515,64	77,82	7,28	38,56	151,04	500,37	25,63	655200,00	655200,00	640600,00	334,12
Ga	<1.55	8,73	<1.54	1,62	<1.95	<0.43	6,90	3,83	17,38	74,61	15,51	2,25
Ge	49,32	46,36	56,02	54,29	59,96	51,06	52,11	58,66	388,08	22,93	5,15	62,17
As	299,22	1145,82	127,93	218,83	203,35	69,92	1071,87	302,85	868,66	<2.98	29,31	144,01
Se	129,92	135,15	178,99	70,83	98,98	428,54	56,14	128,00	9,87	9,69	23,77	<16.08
Mo	<2.02	<0.53	6,97	3,03	<1.79	<0.45	2,99	7,14	<1.10	<0.85	5,37	4,29
Pd	0,61	<0.14	<0.28	<0.14	<0.46	0,89	<0.41	<0.59	<0.18	0,47	<0.25	<0.24
Ag	21,15	27,94	4,48	4,09	7,98	37,94	36,42	6,46	36,83	14,35	14,48	10,74
Cd	<5.17	4,42	<3.97	<1.57	<6.61	<1.54	<4.98	<7.69	1945,45	3132,90	3619,84	<4.31
In	0,19	1,42	0,23	<0.07	0,54	0,61	2,39	<0.28561	27,77	1,95	<0.07	0,89
Sn	22,60	<0.59	<1.44	1,29	42,89	1,92	10,27	<1.75	5,45	15,90	2,00	6,08
Sb	42,90	2,52	7,31	7,51	47,47	5,32	73,84	6,93	3,34	1,30	33,94	2,93
Te	62,08	149,78	14,39	22,46	167,15	189,98	943,85	151,36	<7.00	<3.66	<3.05	29,53
Ta	<0.17	<0.05	<0.07	0,07	<0.14	<0.02	<0.11	<0.09	<0.10	<0.04	<0.038	<0.07
W	0,54	4,89	0,47	2,01	<0.86	0,30	0,81	<0.40	<0.26	<0.399	<0.17	<0.53
Re	<0.50	<0.18	<0.28	<0.11	<0.51	<0.07	<0.33	<0.47	<0.30	<0.15	<0.12	<0.21
Pt	<0.56	<0.21	<0.35	<0.14	<0.30	<0.13	0,41	<0.62	<0.28	<0.17	<0.18	<0.26
Au	0,59	1,55	0,76	1,35	0,57	0,90	2,25	0,68	2,42	<0.05	<0.04	<0.18
Hg	1,46	0,97	0,82	1,57	<0.75	0,37	<0.82	<1.19	71,91	63,32	108,93	<1.09
Pb	6484,39	11426,44	618,88	5192,87	1457,30	1018,25	3879,76	807,57	2229,48	84,38	58,90	614,99
Bi	64,74	36,56	70,74	78,28	46,30	82,21	47,67	20,96	<0.20	<0.15	<0.18	0,69

The results obtained below the detection limit of the particular element of a given analysis are marked with a sign "<".

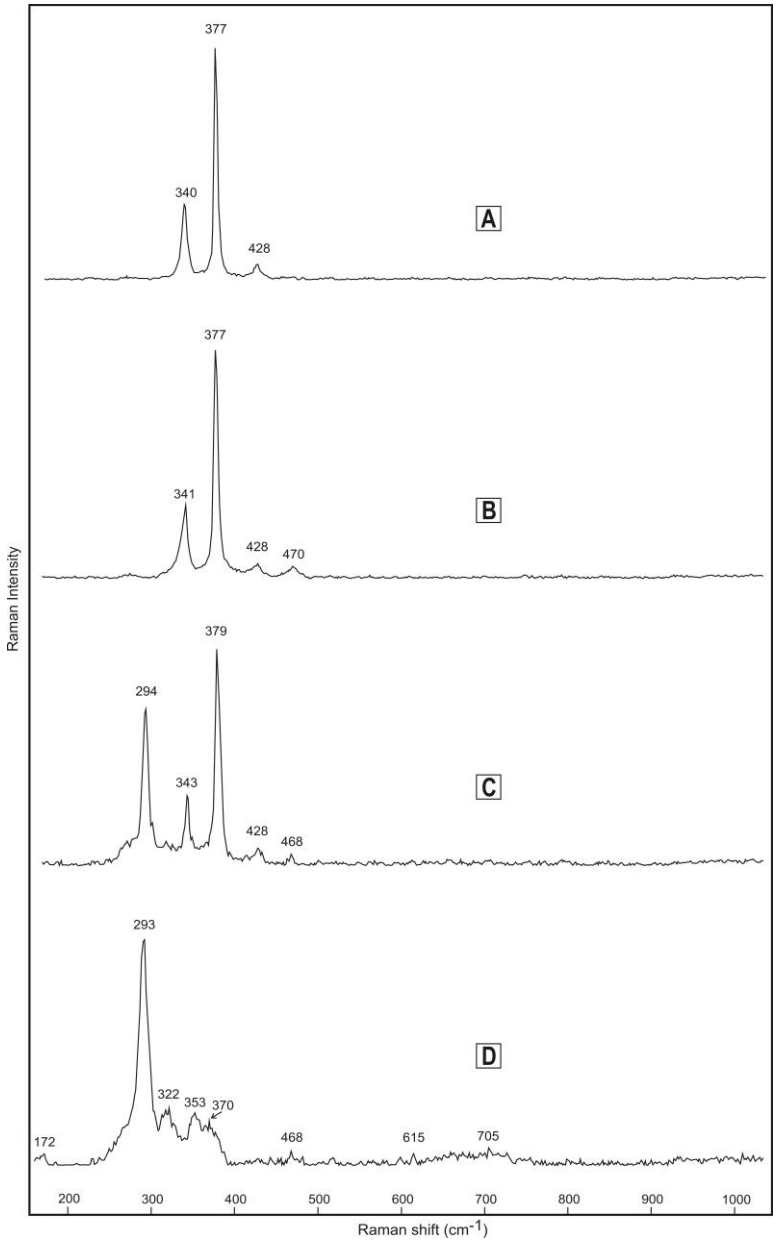


Fig. 2. "Raman" spectra of pyrite and chalcopyrite from the Chelopech deposit at 532 nm wave length (A. - pyrite, analysis №a.1; B. - pyrite, analysis №a.2; C. - pyrite + chalcopyrite, analysis №c.1; D. - chalcopyrite, analysis №d.1.). The locations of the analyzes are shown in Fig. 1.

Table 2.
"Raman" spectral wave's peaks of pyrite and chalcopyrite (cm^{-1})

Pyrite (an. a.1.)	Pyrite (an. a.2.)	Pyrite+Chalcopyrite (an. c.1.)	Chalcopyrite (an. d.1.)
			172
		294	**293**
			322
340	341	**343**	353
377	377	**379**	370
428	428	428	
	470	**468**	**468**
			615
			705

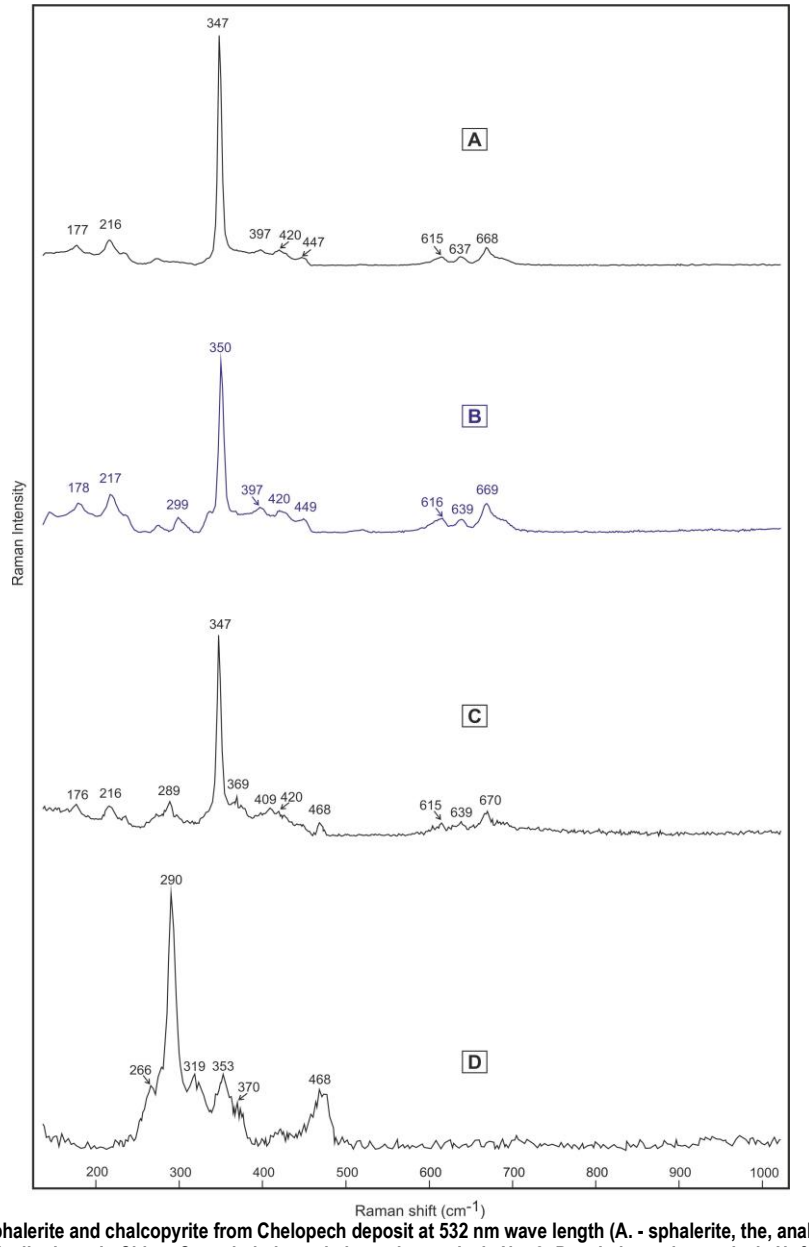


Fig. 3. "Raman" spectra of sphalerite and chalcopyrite from Chelopech deposit at 532 nm wave length (A. - sphalerite, the, analysis №e.1 .; B. - sphalerite, database RRUFF №050005, Taolin deposit, China; C. - sphalerite + chalcopyrite, analysis №e.2; D. - chalcopyrite, analysis № f.1).

Table 3.

"Raman" spectral waves peaks of sphalerite and chalcopyrite (cm^{-1})

Sphalerite (an. e.1.)	Sphalerite, RRUFF № R050005	Sphalerite+Chalcopyrite (an. e.2.)	Chalcopyrite (an. f.1.)
177	178	176	171
216	217	216	266
		289	**290**
	299		319
347	350	347	353
		369	**370**
397	397	409	
420	420	420	
		468	**468**
615	616	615	
637	639	639	
668	669	670	

The successful chemical and structural characteristics of samples in sizes less than 1 μm in diameter is possible by using μ-laser "Raman" spectrometry, which is the big advantage of spectroscopic methods, as well as the fast, easily and proper identification of minerals and ores. The comparison of Raman spectra of the colloform pyrite of *type II* and optically proved chalcopyrite (Fig. 1) indicate an accretion of chalcopyrite in the form of very thin grey stripes with the pyrite. The accretion of these two minerals is well marked by the peaks at 343 and 379 cm^{-1} - typical for pyrite and 294 and 468 cm^{-1}, for chalcopyrite (as submicroscopic inclusions) in the plotted "Raman" spectra, presented on Figure 2 and Table 2 (an. №c.1).

The conducted analyzes from the present studies and previous work (Petrov et al., 2013) indicate, that the zonal structure of the pyrite of *type I* has chemical nature and it is related to variations in the content of elements-impurities, presented mainly by Cu and in some cases of As, Te and Au. The presence of "invisible" gold in pyrite has been the subject of research of a number of authors (Cook and Chryssoulis, 1990; Fleet et al., 1993, Michel et al., 1994; Simon et al., 1999), according to which the gold spatially associate with enrichment of arsenic in pyrite and deficit of Fe. A straight correlation between As and Au is reported by Zacharias et al. (2004) in the study of As-bearing pyrite from the deposit "Rudni", Bohemian Massif.

LA-ICP-MS analysis of sphalerite shows presence of Cu in the range from 245 ppm to 20 317 ppm, as the higher content of Cu is related with higher quantity of Fe (up to 17 106 ppm) (Table 1, an. №e. B). The microscopic studies and the μ-laser „Raman" analysis shows intergrowth texture of sphalerite with an unoriented inclusions of chalcopyrite (the so-called "chalcopyrite disease"). Mineral inclusions of chalcopyrite have been widely recognized in sphalerite from most sulfide deposits, using ore microscopy (Barton and Bethke, 1987). The origin of these micro inclusions of chalcopyrite in sphalerite is not very clear. They have been attributed to exsolution or result of replacement of Fe-bearing sphalerite by an aggregate of chalcopyrite. Craig and Vaughan (1994) suggest that the temperature-dependent exsolution is not the means by which these intergrowths are formed.

Concluding remarks

The comparison of the results, obtained from the μ-Raman spectra and LA-ICP-MS analyses is indicated that the copper is a structurally bound in darker zones of the zonal pyrite with an octahedral habit, while a submicroscopic inclusions of chalcopyrite form the gray stripes in the colloform pyrite. The existence of mineral inclusions of chalcopyrite in the sphalerite, but not the presence of Cu as an element-impurity, is proved by the characteristic peaks at 289, 369 and 468 cm^{-1} of the wavelength spectrum of analysis №e.2. (Figure 3, Table 3).

The increased content of Cu in the sphalerite from the central parts of the ore bodies, the most probably is due to the "chalcopyrite disease", typical for the ore sectors with a high degree of hydrothermal alteration in such type of epithermal deposits.

Acknowledgements. The author would like to thank to the Geological Department of "Dundee Precious Metals Chelopech" EAD for their support during the realization of this study. Special thanks to the Head of the Department of Mineral Resources at the University of Leoben Prof. Dr. Frank Melcher, and the Head of the Laboratory of fluid inclusions Prof. Dr. Ronald Bakker for comprehensive assistance during the research, related to this work.

References

Barton, P., P. Bethke. Chalcopyrite disease in sphalerite: pathology and epidemiology. *Am. Mineral., 72*, 1987. – 451-467.

Cook, N., S. Chryssoulis. Concentrations of "invisible gold" in the common sulphides. *Canad. Mineral., 28*, 1990. – 1-26.

Craig, J., D. Vaughan. Ore Microscopy and Ore Petrography, (2nd Ed.). *John Wiley and Sons, New York*, 1994. – *434*.

Einaudi, M. Copper zoning in pyrite from Cerro de Pasco, Peru. *Am. Mineral. 53*, 1968. – 1748-1752.

Fleet, M., S. Chryssoulis, J. MacLean, R. Davidson, C. Weisener. Arsenian pyrite from gold deposits: Au and As distribution 43 investigated by SIMS and EMP, and color staining and surface oxidation by XPS and LIMS. *Canad. Mineral., 31*, 1993. – 1-17.

Frenzel, G., J. Ottemann. Eine Sulfidparagenese mit kupferhaltigem Zonarpyrit von Nukundamu/Fiji. *Mineral. Deposita,* 1, 1967. – 307-316.

Kant, W., W. Warmada, A. Idrus, L. Setijadji, K. Watanabe. Ore mineralogy and mineral chemistry of pyrite, galena, and sphalerite at Soripesa prospect area, Sumbawa Island, Indonesia. *J. SE Asian Appl. Geol*., *4, 1*, 2012. – 1–14.

Michel, D., G. Giuliani, G. Olivo, O. Marini. As growth banding and the presence of Au in pyrites from the Santa Rita gold vein deposit hosted in Proterozoic metasediments, Goias state, Brazil. *Econ. Geol*., 89, 1994. – 193-200.

Pacevski A., E. Libowitzky, P. Zivkovic, R. Dimitrijevic, L. Cvetkovic. Copper-bearing pyrite from the Čoka Marin polymetallic deposit, Serbia; mineral inclusions or true solid-solution?. *Canad. Mineral., 46, 1*, 2008. – 249-261.

Petrov, D., S. Strashimirov, S. Stoykov, M. Karakusheva. New data for the mineral composition of ores in the western sector of the gold-copper Chelopech. *Ann. Univ. Min. Geol. "St. Iv. Rilski", 56, 1,* 2013. 39-46.

Simon, G., H. Huang, J. Penner-Hahn, S. Kesler, L-S. Kao. Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite. *Am. Mineral*., 84, 1999. – 1071-1079.

Zacharias, J., J. Fryda, B. Paterova, M. Mihaljevic. Arsenopyrite and As-bearing pyrite from Roudny deposit, Bohemian Massif. *Mineral. Mag*., *68*, 2004. – 31-46.

The article is reviewed by Assist. Prof. Sergey Dobrev and recommended for publication by the Department "Geology and Exploration of Mineral Resources".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

NATIVE GOLD AND TELLURIDE MINERALS FROM A DEEP SUPERGENE ZONE IN THE AU-CU DEPOSIT CHELOPECH

Dimitar Petrov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; dimitar@sitost.com

ABSTRACT. In the present study, a new data for mineral composition of Western sector in ore bodies in block 149, found about 700 m below the surface, are shortly discussed. In polished sections of the ore bodies are observed and analyzed with μ-laser "Raman" spectroscopy a native gold and tellurium minerals (hessite and altaite), established in association with pyrite, chalcopyrite, bornite and anglesite. Their typical features and relationships are described. This complex mineralization is likely due to the later deep supergene processes, associated with open fault structures that have changed the character of mineralization in the deeper parts of the deposit. The analyses of the results obtained by present work will complement previous studies of the typical mineralogical and chemical zoning of this type of epithermal deposits.

Key words: „Raman" μ-spectroscopy, ore minerals, deep supergene processes, Chelopech deposit

САМОРОДНО ЗЛАТО И ТЕЛУРОВИ МИНЕРАЛИ ОТ ДЪЛБОЧИННА СУПЕРГЕННА ЗОНА В AU-CU НАХОДИЩЕ ЧЕЛОПЕЧ

Димитър Петров
Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, dimitar@sitost.com

РЕЗЮМЕ. В настоящата работа се съобщават нови данни за минералния състав на участък "Западен", в рудни тела на блок 149, установени на около 700 m под съвременната повърхност. В полирани препарати от рудните тела са наблюдавани и анализирани с μ-лазерна „Раман" спектроскопия самородно злато и телурови минерали (хесит и алтаит), установени в асоциация с пирит, халкопирит, борнит и англезит. Описани са техни характерни особености и взаимоотношения. Това комплексно орудяване вероятно се дължи на по-късни дълбочинни супергенни процеси, свързани с отворени разломни структури, които са променили характера на минерализацията в по-дълбоките участъци на находището. Анализът на резултатите от настоящия труд ще допълни предишни изследвания на типичната минерална и химична зоналност за този вид епитермални находища.

Ключови думи: „Раман" микро-спектроскопия, рудни минерали, дълбочинни супергенни процеси, находище Челопеч

Introduction

The native gold, hessite and altaite are rare ore minerals in the Au-Cu deposit Chelopech. The main reason for the significant lack of sufficient identification of telluride minerals is their mode of occurrence, i.e. as minute phases, often less than 10 μm in size and frequently characterized by complex intergrowths. Optical and electron microscopy, and electron-microprobe analyses are the most used techniques for chemical and physical identification of telluride minerals. It is difficult to identify the telluride minerals during petrographic investigation owing to their small sizes and the similarity of the optical properties of many minerals. Furthermore, where the telluride minerals are only a few micrometers in size, the electron microprobe generally provides only semi-quantitative analyses due interferences from surrounding minerals. The small size of telluride mineral grains does also not allow identification with standard X-ray diffraction (XRD) methods.

The author of present study proposes Raman μ-spectroscopy as a convenient alternative/complimentary method.

The laser Raman μ-spectroscopy is a non-destructive and structurally sensitive technique that can be easily used to identify very small mineral phases less than 10 μm in size with different orientations, such as the telluride minerals. The aim of this study is to provide the Raman spectra obtained on telluride minerals (hessite and altaite), described in the ternary systems Pb-Ag-Te, from a deep supergene weathering zone in the Chelopech deposit (Fig. 1).

Materials and methods

Studies are performed on 10 polished sections, prepared from 20 representative samples for conducting the mineralogical studies of ore bodies of block № 149 from sector "West" in the gold-copper deposit Chelopech. Polished sections are observed through microscope for polarizing light Meiji 9430 supplied by photo camera Meidji DK 1000. Reflected light microscopy is used for establishing the optical and textural characteristics of ore minerals. Raman spectra

were collected using a LABRAM (ISA Jobin-Yvon) instrument at room temperature in the Laboratory of fluid inclusions of the University of Leoben, Austria. A frequency-doubled 100 mW Nd-YAG laser with an excitation wavelength of 532.068 nm was used. The laser power at the sample surface is about 1 to 2 mW. Measurements were carried out with an LMPlanFI 100x/0.8 (Olympus) objective lens. Additional neutral filters with variable optical densities were used to decrease the laser power to prevent damage or transformation of the samples. The subsequent interpretation and analysis of spectral data is accomplished with the software product Crystal Sleuth, which provides an opportunity to compare the obtained spectra with the database RRUFF. The database RRUFF is internet based, freely accessible and maintain a full range of high quality spectral data from well characterized minerals (Downs, 2006).

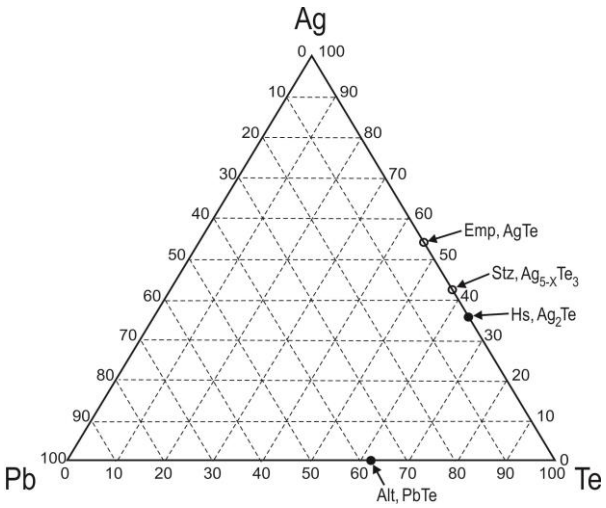


Fig. 1. Compositional diagram (atomic proportions) of the ternary system Ag–Pb–Te for mineral compositions analyzed in the present study (Hs – hessite; Alt – altaite) and other silver tellurides (Stz –stützite; Emp - empressite) from the Elatsite-Chelopech ore field.

Geology

The genesis of the Au-Cu Chelopech deposit (Bulgaria), the major ore producing epithermal deposit in this area, is related to intermediate Late Cretaceous volcanism, which extruded in the northern part of the Central Srednogorie metallogenic zone.

The high permeability of volcanic breccias and volcanites of the Vozdol member of the Chelopech Formation in the area of the deposit is predestined the penetration of the hydrothermal fluids in them and the formation of massive, layered, lenticular and disseminated type of ores with textures of replacement. The ore mineralization in the Chelopech deposit replaces the effusive rock minerals, forming massive bodies, veins and disseminated ores, embedded in the central part of the Chelopech volcano, built of volcanic breccias and volcanites (Kovachev et al., 1992). In areas with the highest degree of cracking and faulting in the deposit, a stockwork and lenticular ore bodies are formed mainly, which together with the vein-disseminated type of ore mineralization are the most common among volcanic breccias and volcanites. In the development of so-called secondary mineralized breccias (Chambefort, 2005) are formed massive type of ore bodies, whose matrix consists of ore minerals and phenocrysts of the host rocks.

A massive ore (enargite-tennantite-chalcopyrite) mineralization, developed on an earlier massive pyrite was found in block №149, level 225 at the ore sector "West" of the Chelopech deposit (Fig. 2, A, B). This development of Cu-As-S mineralization over an earlier massive-sulphide ore is typical for the main economic ore, found in the central parts of the ore bodies in the form of massive aggregates in the deposit. Rarely with that mineralization is established a native gold as well (Fig. 2, D).

The formation of high-sulphidation epithermal deposits is a result of fluids (containing gases such as SO_2, HF, HCl), penetrating directly from the hot magma. These fluids are highly acidic (pH 2-3) and after their interaction with the host rocks, dissolve most of the rock forming minerals, leaving mainly quartz. As a result of this process the host rocks become cavernous – so called “vuggy quartz” texture (Fig. 2, D). Rich in gold and copper fluids, which rise from the magma, penetrate the created permeable medium and unload the metals within porous and cavernous (“vuggy quartz”) areas. The factors such as the host rocks and tectonics have influenced the ore-forming processes and character of the mineralization in the Chelopech deposit. A later depth supergene processes, associated with an open fault structures, change the character of the mineralization as extracting and redeposition a large amount of chemical elements, as a result of which are formed a complex ores rich in copper, gold, silver, tellurium, bismuth, lead and zinc. The typical ore minerals for these deep supergene areas of the deposit are bornite, often replacing pyrite and chalcopyrite (Fig. 2, D), native gold, hessite, altaite, nagyagite, tetradymite and others telluride minerals like stützite and empressite. The telluride assemblages are commonly deposited in a later mineralization stage, at specific physicochemical conditions: relatively high oxidation potential and rather low temperature of formation (250-200-170°C) (Bonev et al., 2005). According to Tokmakchieva (2008) these minerals are formed of systems concentrated with tellurium, gold and silver under subsolid bringing processes under temperatures lower than 210°C. Gold and other noble metals precipitate at sharp pressure decrease, solution salt decrease and their temperature.

The impact of the deep supergenesis on the ore-forming processes in the Chelopech deposit is mentioned by the author in earlier publications, related to the study of anglesite from the deposit (Petrov, 2014). Under certain conditions due to the deep supergene weathering, minerals such anglesite and cerussite could be discovered within the deeper parts of the deposits, containing Pb-Zn mineralization. These minerals belong to the fourth stage of mineralization in the Chelopech deposit: quartz - carbonate – barite stage and probably are formed as a result of the interaction of cool and with nearly neutral pH magmatic fluids with the host rocks. The native gold, hessite and altaite, presented in this work, are established in the same polished sections, where the secondary minerals anglesite and cerussite are observed, analyzed and reported by the author in Petrov (2014).

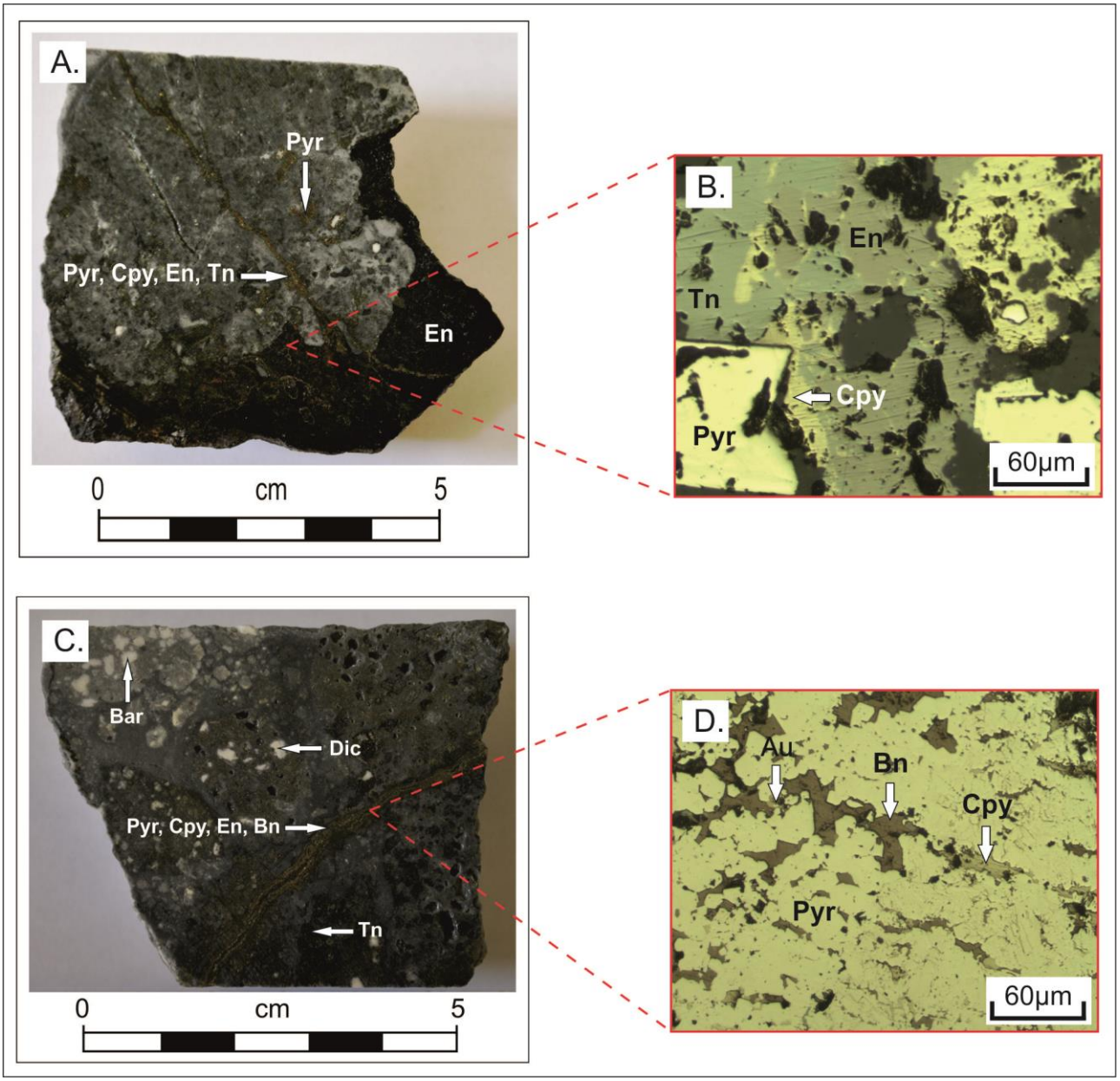


Fig. 2. Massive, vain and cavernous ("vuggy quartz") textures.

- **A.** A drill core sample № DH15CS2 (veins filled with pyrite (Pyr), chalcopyrite (Cpy), enargite (En) and tennantite (Tn), cut by massive enargite);
- **B.** Mineral association in polished section of the marked area, observed in reflected light, parallel nicols (chalcopyrite (Cpy) aggregates among enargite (En) and tennantite (Tn) matrix; a well-formed pyrite (Pyr) crystals and gangue minerals);
- **C.** A drill core sample № DH15CS4 (pyrite (Pyr) – chalcopyrite (Cpy) – enargite (En) – tennantite (Tn) – bornite (Bn) vain mineralization, also dickite (Dic) and barite (Bar) as gangue minerals among typical cavernous quartzite);
- **D.** A micro-photo of a polished section, observed in reflected light, parallel nicols (bornite (Bn), chalcopyrite (Cpy) and native gold (Au) in pyrite (Pyr) matrix).

Results and discussions

The ore mineralization in the Chelopech deposit is characterized by a rich geochemical variety, typical for the high-sulphidation epithermal Au-Cu deposits. The main economic elements Cu, Au and Ag have a strong correlation relationship with higher contents of As due to the large presence of sulphosalts such as tennantite, enargite, luzonite and famatinite, as well as high content of S, which main carrier is pyrite. The correlations between elements in ores from the Chelopech deposit are reported in Petrov and Popov (2015). Despite relatively inert behavior of Ti during the hydrothermal processes, the chemical element shows a tendency to slight enrichment in the areas with advance argillic alteration, in which are located the ore bodies as well. This often presence of Ti is due to the extraction of some petrogenic components from the host rocks, during the hydrothermal alteration (Hikov, 2001). Using an ore microscope and the Raman µ-spectral analysis, reported in Petrov (2016), is confirmed the replacement of the apatite by a mixture of quartz and TiO_2 (anatase), during the advance argillic alteration of ore hosting rocks.In a deep supergene conditions, the bornite replaces chalcopyrite and pyrite in association with native gold (Fig. 2, D) and hessite (Fig 3, a). These later deep supergene processes have led to the formation of inclusions of altaite (Fig. 3, b), among quartz-anatase-pyrite mineral association, typical for the studied ore sector.

The native gold is established as very fine (3 - 5μm) irregular grains together with bornite and chalcopyrite among pyrite matrix (Fig. 2, D). In previous mineralogical studies (Petrov et al., 2013) of the same ore sector of the deposit a native gold is found as fine (10-50 μm) inclusions among enargite or in association with pyrite and baryte. The shape of gold inclusions is irregular or elongated along the micro fractures in matrix from enargite or barite. Chemical composition of the native gold shows low content of Ag (up to 7.45 wt. %) and sustainable content of copper within 2.89 to 7.93 wt.% (Petrov et al., 2013).

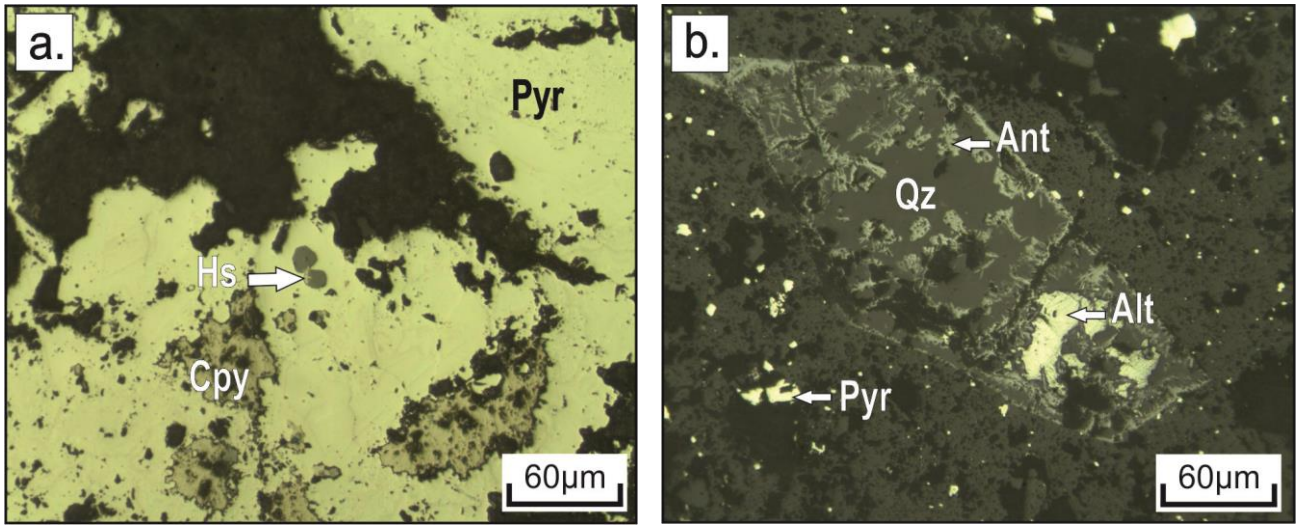


Fig. 3. Micro-photos of ore minerals in polished sections from the Western sector of the gold-copper deposit Chelopech (reflected light):

a. A massive pyrite (Pyr), corroded by chalcopyrite (Cpy) and gangue minerals (black) is observed. Among the pyritic matrix a mineral inclusion of hessite (Hs) in quartz grain (dark grey) is established.

b. Inclusions of altaite (Alt) in idiomorphic gangue mineral (apatite?), fully corroded by quartz (Qz) and anatase (Ant), together with fine single grains of pyrite (Pyr), among gangue mineral mass are established.

The newly identified in the Au-Cu deposit Chelopech hessite (Ag_2Te) is a rare ore mineral. In plane-polarized incident light the hessite is grey with slightly brownish tint, scratches, while in crossed nicols it shows a dark orange and bluish distinct anisotropy. It is found as very fine (up to 10 μm) inclusions in quartz, in association with pyrite, chalcopyrite, bornite, and gangue minerals quartz, barite, dickite, anhydrite and kaolinite (Fig. 3, a). The mineral probably is deposited in a later mineralization stage, and its spatial and structural relationships give grounds to be assigned to the galena-sphalerite mineral association in the ore deposit. The hessite in the Elatsite deposit, part of the same Elatsite-Chelopech ore field, where the studied deposit is located, occur as fine (1-30 μm) inclusions, or as exolutions in bornite and chalcopyrite, or at their grain boundaries, associated with native gold, native Te, stützite, sylvanite, empressite, merenskyite, or clausthalite (Petrunov et al., 1992; Tarkian et al., 2003; Bogdanov et al., 2005).

It is presented on Figure 4. A., B. and Table 1 the obtained spectrum of hessite from the Chelopech deposit, compared with those of database RRUFF (№ R070445, the Klondike mine, USA). The positions of the typical peaks in the “Raman” waves in the spectrum of the mineral are marked by numbers. According to the RRUFF database, hessite from the Klondike mine, the positions of the "Raman" spectra’s peaks are indicated at 345 and 381 cm^{-1} (Fig. 4, B, Table 1). Apopei et al. (2014) reported the Raman spectrum of hessite with two strong peaks at 119 cm^{-1} and 138 cm^{-1}, which are not recognizable on the Raman spectra in the present work. The data received in the present study differ from the compared spectrum in the range of 1-2 cm^{-1} (Fig. 4, A, B). The very small size of the mineral aggregates do not allows a correct electron microprobe analysis. According to the published data (Apopei et al., 2014) the content of Ag and Te in hessite is from 57.35 wt.% to 60.61 wt.%, and from 35.77 wt.% to 38.35 wt.%, respectively.

Altaite (PbTe) is also very rare established mineral in the western sector of the deposit and it belongs to the pyrite-chalcopyrite mineral association. It is found as fine grains up to 20-30 μm among idiomorphic gangue mineral (apatite), fully corroded by quartz (Qz) and anatase (Ant) (Fig. 3, b). In some cases the altaite displays triangular cleavage breakouts and it is difficult to separate from galena only by its optical properties. The mineral has tin white color with a grayish-green hue and high metallic luster. It is reported as irregular inclusions in coarse nagyagite, associated with hessite, native gold, and hedleyite in similar to the present study vuggy quartz host rocks at the Hedley Monarch Mine, Canada (Thompson, 1949).

According to Vymazalova et al. (2014) the synthetic phase PbTe (altaite) is “Raman” inactive, and does not reveal a spectrum in the range of 80 to 1600 cm^{-1}. This is confirmed by the received “Raman” spectra of natural altaite in the present study (Fig. 4, C) and those of RRUFF database №R060939, Mattagami mine, Quebec, Canada (Fig. 4, D).

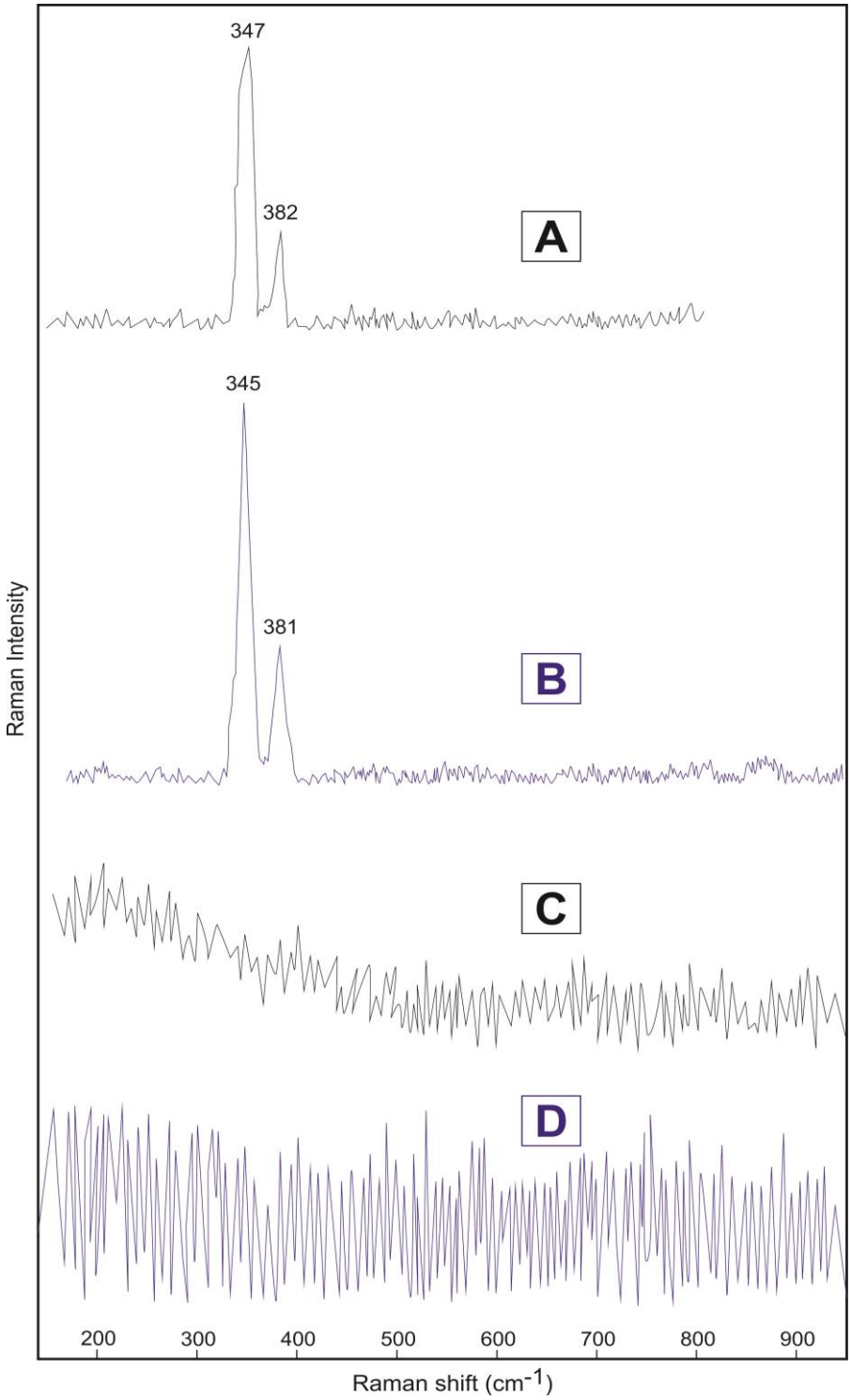


Fig. 4. "Raman" spectra of hessite and altaite from the Chelopech deposit and RRUFF database at 532 nm wave length (A. - hessite; B. – hessite, database RRUFF №R070445; C. – altaite; D. altaite, database RRUFF №060939).

Table 1.
"Raman" μ-spectral wave's peaks of hessite (cm^{-1})

Hessite (the Chelopech deposit)	Hessite, RRUFF database №R070445 (the Klondike mine)
347	345
382	381

Concluding remarks

The established mineral phases of native gold, hessite and altaite in this work, corresponds to deep supergene zone, associated with open fault structures in the Chelopech deposit. These phases are observed as small grains in association with pyrite, chalcopyrite, bornite, anatase, and secondary minerals like anglesite and cerussite.

The results presented in this study confirm that Raman μ-spectroscopy as quick and generally non-destructive method can be considered as an innovative technique with a potential to better characterize and identify rare and tiny phases such as telluride minerals. Together with the optical microscopy the laser Raman μ-spectroscopy it is a modern powerful diagnostic tool for mineral identification.

Acknowledgements. The author would like to thank to the Geological Department of "Dundee Precious Metals Chelopech" EAD for kindly providing samples used in the preparation of this work. Special thanks to the Head of the Department of Mineral Resources at the University of Leoben Prof. Dr. Frank Melcher, and the Head of the Laboratory of fluid inclusions Prof. Dr. Ronald Bakker for comprehensive assistance during the research, related to this study.

References

Apopei, A. I., G. Damian, N. Buzgar, S. Milovska, A. Buzatu. New occurrences of hessite, petzite and stützite at Coranda-Hondol open pit (Certej gold-silver deposit, Romania). *In Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9, 2, 2014. - 71-78.

Bogdanov, K., A. Filipov, R. Kehayov. Au-Ag-Te-Se minerals in the Elatsite porphyry-copper deposit, Bulgaria *Geochem, Mineral. and Petr.*, 43, 2005. - 13-19.

Bonev, I.K., R. Petrunov, N.J. Cook, C.L. Ciobanu. Kostovite and its argentian varieties: Deposits and mineral associations. *Geochem, Mineral. and Petr.*,42, 2005. - 1-22.

Chambefort, I. The Cu-Au Chelopech Deposit, Panagyurishte District, Bulgaria: Volcanic Setting, Hydrothermal Evolution, and Tectonic Overprint of a Late Cretaceous High-sulfidation Epithermal Deposit. *Terre & Environnement,* 52, 2005. - *173.*

Downs, R. T. The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals. - *In: Proceedings of the 19th general meeting of the IMA, Kobe, Japan.* 2006. - O03-13.

Kovachev, V., S. Bakardjiev, Ch Gurov, D. Dimov. Spatial correlation between the elements in the Chelopech deposit. *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 53, 3,1992. - 49-57 (in Bulgarian).*

Petrov, D. Laser "Raman" spectroscopy of anglesite and cubanite from deposit "Chelopech". *Ann. Univ. Min. Geol. "St. Iv. Rilski",* 57, 1, 2014. - 77-82.

Petrov, D. Possibilities of the laser "Raman" spectroscopy to study a zonal, polymorphic and with elements-impurities ore minerals. - *The International Forum, NMRU-Russia*. 2016.

Petrov, D., S. Strashimirov, S. Stoykov, M. Karakusheva. New data for the mineral composition of ores in the western sector of the gold-copper Chelopech. *Ann. Univ. Min. Geol. "St. Iv. Rilski"*, 56, 1, 2013. – 39-46.

Petrov, D., K. Popov. Correlations between elements in ores from the gold-copper deposit Chelopech, Bulgaria. *Ann. Univ. Min. Geol. "St. Iv. Rilski",* 58, 1, 2015. - *93-98.*

Petrunov, R.,P. Dragov, G. Ignatov, H. Neykov, Ts. Iliev, M. Vasileva, V. Tsatsov, S. Djunakov, K. Doncheva. Hydrothermal PGE mineralization in Elacite porphyry-copper deposit (the Sredna Gora metallogenic zone, Bulgaria). *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.*, 45, 4, 1992. - 37-40.

Tarkian, M., U. Hünken, M. Tokmakchieva, K. Bogdanov. Precious-metal distribution and fluid inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 38, 2003. - 261-281.

Tokmakchieva, M. The role of deep hypergenesis for forming complex mineralizations. *Ann. Univ. Min. Geol. "St. Iv. Rilski",* 51, 1, 2008. – 62-67.

Thompson, R.M. The telluride minerals and their occurrence in Canada. *American Mineralogist*: 34; 1949. - 341-382.

Hikov, A. Metasomatic zoning and geochemistry of rare elements in hydrothermally altered Upper Cretaceous vulcanites near the peak Pesovets, Panagyurishte. *Geochem, Mineral. and Petr.*, 38, 2001. - 101-111 (in Bulgarian).

Vymazalova A, Zaccarini F, Bakker RJ. Raman spectroscopy characterisation of synthetic platinum-group minerals (PGM) in the Pd–Sn–Te and Pd–Pb–Te ternary systems. *European journal of mineralogy*, 26, 2014. - 711-716.

The article is reviewed by Prof. Dr. Strashimir Strashimirov and recommended for publication by the Department "Geology and Exploration of Mineral Resources".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

TRACE-ELEMENTS IN COLLOMORPH MARCASITE AND CHALCOPYRITE FROM SILVER-GOLD DEPOSIT SEDEFCHE, EASTERN RHODOPES

Georgi Lyutov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; georgi_lutov@yahoo.com

ABSTRACT. Sedefche is an epithermal type Ag-Au deposit, part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field in the Eastern Rhodopes. The ore mineralization is hosted in volcanic tuffs, affected by intensive hydrothermal alteration. The deposit is located near the ground surface hence its upper parts are subject to supergene changes. The primary ore minerals are sulfides and sulfosalts. The supergene minerals are typically hydroxides, sulfates, carbonates and arsenates.
Samples from drill cores and trenches have been studied through optical microscopy, X-ray spectral micro-analyses and LA-ICP-MS (Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy) in order to determine trace elements (particularly rare and precious), their content and distribution in collomorph marcasite and chalcopyrite from deposit Sedefche.
The studies that were carried out, established that the presence of Au in marcasite is relatively low and unevenly distributed. Silver is more abundant, but its content and distribution are even more variable then these of Au. The studies established that Au and Ag contents increase somewhat towards the cores of collomorph marcasite aggregates. Brighter concentric circles in the collomorph marcasite are due to admixtures of Sb and As. Marcasite also hosts significant amounts of Tl.
Chalcopyrite exhibits very low Au content and some Ag with very erratic distribution. The only other trace element with somewhat higher content in chalcopyrite is Ni.

Key words: *trace elements, silver-gold deposit, sulfide minerals, Sedefche deposit*

ЕЛЕМЕНТИ-ПРИМЕСИ В КОЛОМОРФЕН МАРКАЗИТ И ХАЛКОПИРИТ ОТ СРЕБЪРНО-ЗЛАТНОТО НАХОДИЩЕ СЕДЕФЧЕ, ИЗТОЧНИ РОДОПИ

Георги Лютов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски", 1700 София; georgi_lutov@yahoo.com

РЕЗЮМЕ. Седефче е епитермално Ag-Au находище, често от Звездел-Пчелоядското рудно поле в Източните Родопи. Рудната минерализация е вместена във вулкански туфи, засегнати от силни хидротермални промени. Находището се намира близо до земната повърхност и така горните му части са подложени на хипергенни промени. Първичните рудни минерали са сулфиди и сулфосоли. Хипергенните минерали са предимно хидроксиди, сулфати, карбонати и арсенати.
Проби от сондажни ядки и канави са изследвани с оптичен микроскоп, рентгено-спектрални микроанализи и LA-ICP-MS за да се определят елементите-примеси (в частност редки и благородни), тяхното съдържание и разпределение в коломорфен марказит и халкопирит от находище Седефче.
При проведените изследванията се установява, че присъствието на Au в марказита е относително ниско и неравномерно разпределено. Среброто е в по-голямо количество, но неговото разпределение е още по-неравномерно от това на Au. При изследванията се установява, че съдържанията на Au и Ag се повишават в известна степен към центъра на коломорфните марказитови агрегати. По-ярките концентрични кръгове в коломорфния марказит се дължат на примеси от Sb и As. Марказитът съдържа и значителни количества от Tl.
Халкопиритът демонстрира много ниско съдържание на Au и малко Ag с много неравномерно разпределение. Единственият елемент-примес с по-високо съдържание в халкопирита е Ni.

Ключови думи: *елементи-примеси, сребърно-златно находище, сулфидни минерали, находище Седефче*

Introduction

Deposit Sedefche is located in the Eastern Rhodopes, 25 km southeast of the town Momchilgrad, near the village Sedefche. Silver was mined from deposit Sedefche in The Early Middle Ages and possibly earlier. Ancient mining works, discovered during the modern geologic surveys confirm this presumption (Tzekova, 1965; Cjiflijanov, 1995; Dragiev and Dragieva, 2006). Since 1963 the deposit has been subject of prospecting and surveying and it was initially classified as "ore occurrence" (Atanasov, 1965; Atanasov and Breskovska, 1964).

Geological setting

The deposit is considered to be part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field in the area of Zvezdel paleo-volcano (Georgiev, 2012). The ore field belongs to Momchilgrad ore sub-region, which coincides spatially with Momchilgrad depression. The depression covers an area of 1500 km^2, south of the river Arda, around towns Dzebel, Momchilgrad and Krumovgrad. Two structural complexes outcrop in the area of deposit Sedefche (Dragiev and Dragieva, 2006; Georgiev, 2012) (Fig. 1):

Pre-tertiary metamorphic complex – it consists of metamorphic rocks, represented by biotite and dual-mica gneiss, amphibolite-biotite gneiss (aPt1), marble (cPt1) and kyanite-garnet-biotite schists.

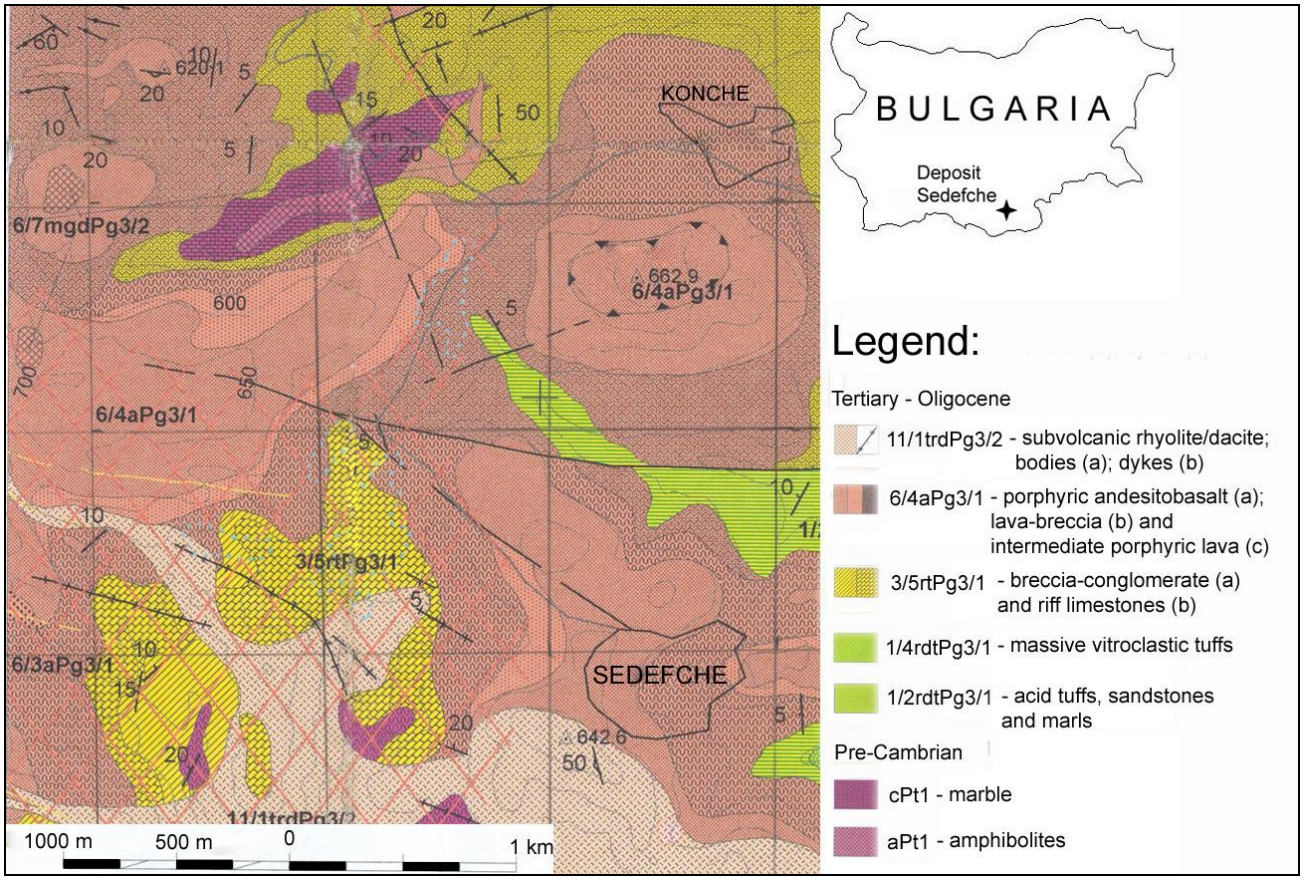


Fig. 1. Geologic map of deposit Sedefche and surounding area (frgament, taken from Map Sheet K-35-88-B-a "Zvezdel"; Ministry of Environment and Waters; Scientific Investigations' Institute "Geology and Geophysics"; 1998).

Tertiary volcanogenic-sedimentary cover – it is represented by sedimentary, volcanogenic-sedimentary and volcanic rocks. Limestones (3/5rtPg3/1 - b) and sandy-loam rocks (3/5rtPg3/1 - a) cover unconformly the metamorhic rocks. In some areas, limestones have undergone silification, as a result of hydrothermal alterations. Volcanic manifestations in Oligocene (Pg_3), formed acid to intermediate lava plains and dykes of rhyolite, dacite and andesite (11/1trdPg3/2 a/b). Geologic surveys outlined 3 ore bodies in the deposit. Their morphology is defined by precious metal content and they do not have sharp boundaries: Northern ore body – it is located about 200 m to the north of the village Sedefche. It is placed between silificated tuffs, tuff-breccia and andesite (6/4aPg3/1 – a/b). The rocks are kaolinized, sericitized and pyritized. The contents of Au and Ag vary significantly. Evidence of ancient mining has been discovered in this area, which coincides with higher contents of Au and Ag. Southern ore body – it is located about 500 m westwards from the village Sedefche. The South ore body consists of unevenly silificated limestones (3/5rtPg3/1 - b), which lie above sandy-loam sediments (1/2rdtPg3/1). Silification has affected the upper parts of the limestones and is up to 6-7 m thick. Ralitza Dere is the third ore body, located in the ravine with the same name, about 300 m to the NNW from the North ore body. The largest outcrop of metamorphic rocks in the area is in that ravine. The ore body is emplaced within marble (cPt1), which is heavily silificated. The North ore body is the most promising one for finding Au and Ag according to the results of geologic surveys. Ore bodies in other deposits in the Zvezdel-Pcheloyad ore field, are vein-like, while these in the Sedefche deposit have layer-like, pseudo-conform shape (Georgiev, 2012). The volcanic rocks in the area, have been subjected to heavy hydrothermal alterations, such as, silification, sericitization, propylytization (Atanasov, 1965; Radonova, 1973). Silification is the most widespread – it affects limestones (3/5rtPg3/1 - b) in the Southern ore body, pyroclastic rocks, andesite (6/4aPg3/1 – a/b) in North ore body and marble (cPt1) in Ralitza Dere.

Ore minerals

More than 20 ore minerals have been reported in deposit Sedefche. The primary ore minerals are sulfides and sulfosalts. Supergene minerals are represented by oxides, hydroxydes, sulfates, carbonates and arsenates (Mladenova, 1998; 1999; Strashimirov et al., 2005; Milev et al., 2007). The most widespread primary ore minerals in the deposit are:

Pyrite – abundant ore mineral in the deposit, forming euhedral to semi-euhedral crystals. Later it has been partially turned into marcasite, which in turn exibits anhedral and/or collomorph structure.

Arsenopyrite – it is also very widespread ore mineral in the deposit, forming euhedral crystals with rhomboid or needle-like section.

Sphalerite – it is commonly encountered ore mineral in the deposit. It associates with other sulfides and exhibits semi-euhedral crystals.

Chalcopyrite – it has limited distribution and is encountered in isolated aggregates with other ore minerals. Sometimes it is seen as emulsion in sphalerite.

Galena – it is relatively rare mineral in the deposit – it appears as small isolated semi-euhedral crystals.

Tennantite-tetrahedrite – it has significant distribution in the deposit. Its composition is usually closer to the Sb-rich variety – tetrahedrite. It is silver-bearing and also contains admixtures of Fe and Zn.

Acanthite – it is one of the most important silver-bearing minerals in the deposit. It forms mostly isolated anhedral aggregates.

Ag-sulfosalts – (*proustite, pyrargyrite, miargyrite and others*) – many minerals of this group contribute to the overall silver content in the deposit.

The typical supergene ore minerals are the following:

Fe-hydroxides – goethite and lepidocrocite – they are widespread and common product of supergene alteration of Fe-rich sulfide minerals.

Scorodite – it is product of oxidation of arsenopyrite and As-rich sulfosalts.

Jarosite – it is common weathering product of iron sulfides and potassium-rich minerals in volcanic tuff host rocks.

Methods of study

Polished sections have been prepared from drill core samples, taken from depth of 42 m (Sample 28) and trenches (Sample 60). They have been studied with optical reflected-light microscopes Meiji 9430 and Olympus BX60. As a result, several areas and minerals have been designated for further studies by X-Ray microanalyses and LA-ICP-MS, in order to clarify the distribution and content of rare and trace elements and particularly gold. X-Ray micro-analyses (*microprobe*), described in the current paper, have been carried out in Montanuniversitaet Leoben with the support by Prof. PhD Federica Zaccarini. LA-ICP-MS (*Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy*) studies have been carried out at the Geological Institute of the Bulgarian Academy of Sciences through device Perkin-Elmer SCIEX ELAN DRC-e and LA New Wave Research UP-193; λ=193 nm; laser Ar-F with the support by PhD Dimitrina Dimitrova.

Results of the study

Results from 18 microprobe analyses (Tables 1, 3, 5, 7) and 16 LA-ICP-MS analyses (Tables 2, 4, 6, 8) of marcasite and chalcopyrite are presented in this study. Electron microscope photographs show the location of microprobe point analyses. LA-ICP-MS analyses correspond to the same points as these from microprobe. However, not all points of microprobe analyses have been subject to LA-ICP-MS analyses.

Marcasite (FeS_2): The collomorph marcasite aggregates have distinctive concentric-zonal structure, which is clearly visible on Fig 2 and Fig. 3.

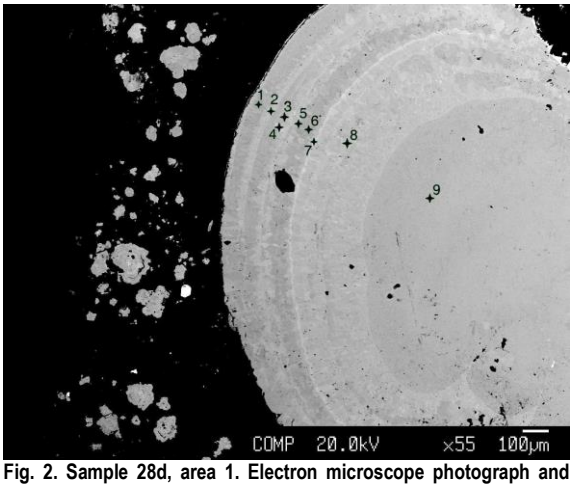


Fig. 2. Sample 28d, area 1. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses in collomorph marcasite aggregate.

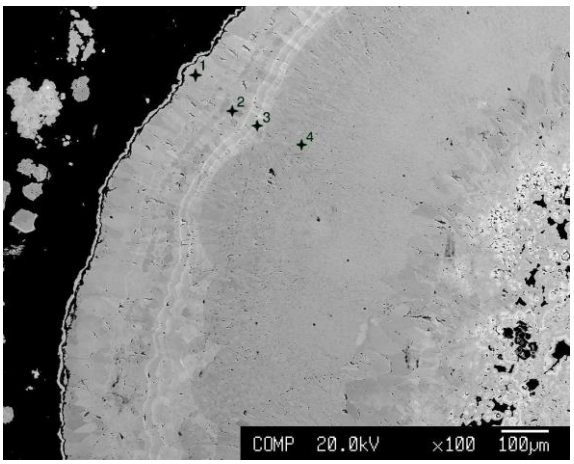


Fig. 3. Sample 28d, area 2. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses in collomorph marcasite aggregate.

Microprobe analyses of marcasite show that the composition varies little from the mineral's stoichiometry. Nevertheless, admixtures of some other elements have been discovered in small quantities, around the detection limit of the microprobe (Tables 1 and 3), hence they are not very accurate. LA-ICP-MS analyses in the same areas have given more accurate results about these trace elements and their content (Tables 2 and 4). Rare and precious metals are of particular interest, such as Au and Ag. According the LA-ICP-MS analyses, Au content in marcasite varies from less than 0.092031 ppm (Sample 28d-2; p.1; Table 4) to 0.19 ppm (Sample 28d-2; p.2; Table 4).

Table 1.
Results of microprobe point analyses in sample 28d, area 1

Sp. 28d-1	Composition in mass %										mineral
	As	S	Fe	Zn	Ag	Co	Cu	Au	Cd	Sb	
P. 1	***0.325***	***53.486***	***47.325***	***0.025***	***0.031***	***0.062***	***-***	***-***	***-***	***-***	***marcasite***
P. 2	***0.813***	***52.086***	***46.997***	***-***	***0.052***	***0.042***	***0.022***	***0.068***	***-***	***0.162***	***marcasite***
P. 3	***0.373***	***53.482***	***47.568***	***-***	***-***	***0.068***	***-***	***-***	***-***	***0.044***	***marcasite***
P. 4	***0.383***	***53.295***	***47.440***	***-***	***-***	***0.072***	***-***	***-***	***0.032***	***0.018***	***marcasite***
P. 5	***0.860***	***52.529***	***47.248***	***0.001***	***-***	***0.072***	***0.022***	***0.014***	***0.011***	***0.117***	***marcasite***
P. 6	***0.078***	***52.241***	***47.844***	***0.002***	***-***	***0.081***	***0.002***	***0.014***	***-***	***-***	***marcasite***
P. 7	***0.639***	***53.112***	***47.025***	***0.025***	***0.020***	***0.067***	***0.005***	***0.062***	***0.048***	***0.703***	***marcasite***
P. 8	***0.383***	***53.368***	***47.500***	***0.024***	***-***	***0.083***	***-***	***-***	***0.024***	***0.045***	***marcasite***
P. 9	***0.240***	***53.390***	***47.697***	***0.036***	***0.011***	***0.071***	***0.019***	***0.007***	***-***	***0.046***	***marcasite***

Table 2.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28d, area 1

Element [ppm]	28d-1; p.1; (*marcasite*)	28d-1; p.2; (*marcasite*)	28d-1; p.6; (*marcasite*)	28d-1; p.7; (*marcasite*)	28d-1; p.8; (*marcasite*)	28d-1; p.9; (*marcasite*)
Cr	*41.92*	*46.45*	*52.33*	*46.60*	*48.44*	*51.59*
Mn	*174.11*	*193.40*	*411.02*	*75.72*	*86.58*	*289.34*
Fe[1]	*473250.00*	*469970.00*	*478440.00*	*470250.00*	*475000.00*	*476970.00*
Co	*0.75*	*0.65*	*<0.29079*	*20.33*	*0.27*	*<0.2925*
Cu	*33.11*	*62.36*	*5.88*	*15.65*	*26.29*	*41.99*
Zn	*47.03*	*98.33*	*18.47*	*70.70*	*91.83*	*80.18*
As	*4487.03*	*5038.97*	*983.36*	*6746.74*	*4067.45*	*1713.93*
Mo	*58.84*	*66.16*	*4.63*	*65.29*	*55.85*	*30.56*
Ag	***29.40***	***43.29***	***16.34***	***12.92***	***33.16***	***64.17***
Sb	*602.46*	*791.02*	*67.79*	*4799.97*	*698.24*	*164.21*
Au	***<0.13055***	***<0.15955***	***0.14***	***<0.12389***	***<0.13584***	***<0.15838***
Tl	***146.82***	***158.09***	***8.14***	***49.94***	***13.38***	***11.66***

[1] - Internal standard of Fe content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Table 3.
Results of microprobe point analyses in sample 28d, area 2

Sp. 28d-2	Composition in mass %										mineral
	As	S	Fe	Zn	Ag	Co	Cu	Au	Cd	Sb	
P. 1	***0.547***	***52.961***	***47.662***	***0.035***	***0.036***	***0.073***	***0.016***	***0.068***	***-***	***0.017***	***marcasite***
P. 2	***0.237***	***53.033***	***47.915***	***0.012***	***-***	***0.072***	***-***	***0.007***	***0.019***	***-***	***marcasite***
P. 3	***0.991***	***52.738***	***46.700***	***-***	***0.029***	***0.124***	***-***	***-***	***-***	***0.742***	***marcasite***
P. 4	***0.239***	***53.116***	***47.705***	***0.013***	***0.016***	***0.042***	***0.002***	***-***	***0.014***	***-***	***marcasite***

Table 4.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28d, area 2

Element [ppm]	28d-2; p.1; (*marcasite*)	28d-2; p.2; (*marcasite*)	28d-2; p.3; (*marcasite*)	28d-2; p.4; (*marcasite*)
Ti	*15.44*	*16.01*	*15.08*	*16.56*
Cr	*53.58*	*46.32*	*48.55*	*44.78*
Mn	*236.73*	*184.51*	*204.85*	*127.00*
Fe[2]	*476620.00*	*479150.00*	*467000.00*	*477050.00*
Cu	*15.40*	*53.98*	*26.58*	*71.66*
Zn	*106.96*	*85.87*	*90.53*	*96.84*
As	*6642.91*	*6034.56*	*1658.92*	*2618.32*
Mo	*76.45*	*47.16*	*22.61*	*61.59*
Ag	***11.59***	***72.63***	***48.56***	***118.87***
Sb	*827.70*	*2466.19*	*133.35*	*202.77*
Au	***<0.092031***	***0.19***	***<0.14191***	***<0.12209***
Tl	***138.45***	***17.60***	***7.22***	***16.35***

[2] - Internal standard of Fe content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Silver content in marcasite varies from 11.59 ppm (Sample 28d-2; p.1; Table 4) to 118.87 ppm (Sample 28d-2; p.4; Table 4). The presence of Tl in marcasite is also noteworthy. Its content varies from 7.22 ppm (Sample 28d-2; p.3; Table 4) to 158.09 ppm (Sample 28d-1; p.2; Table 2). It appears that Au and Ag contents in marcasite increase somewhat towards the cores of collomorph aggregates, but this may be just a coincidence. The microprobe and LA-ICP-MS analyses have discovered that the brighter rings in marcasite have increased content of Sb and As.

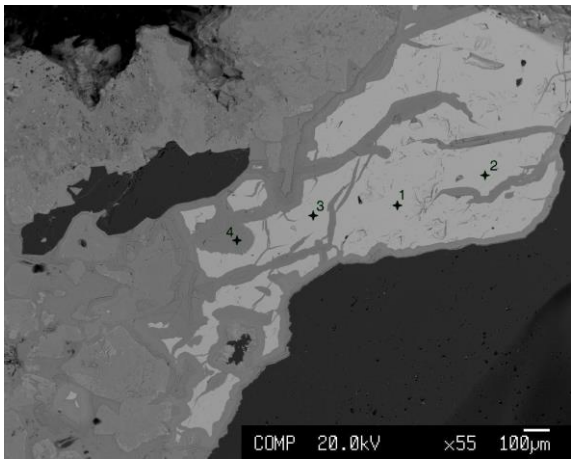


Fig. 4. Sample 60a, area 1. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p.1-3 chalcopyrite; p.4 – supergene halo of Fe-hydroxides and malachite.

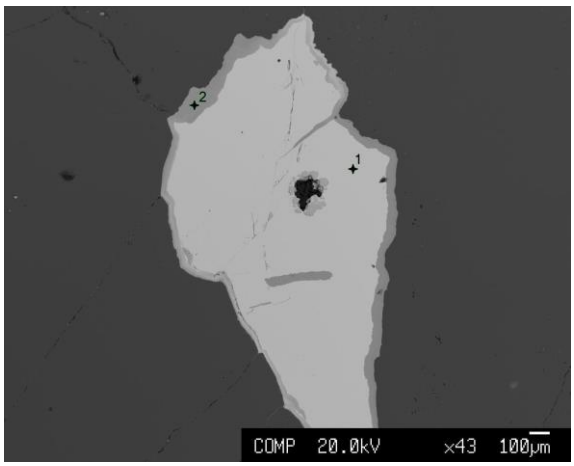


Fig. 5. Sample 60a, area 2. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p.1 chalcopyrite; p.2 – supergene halo of Fe-hydroxides and malachite.

The analyses show that Au content in chalcopyrite is very low – from <0.129 to <0.165 ppm (Tables 6 and 8), which is near the lower detection limit of LA-ICP-MS device. Ivestigated chalcopyrite has some Ag content, with erratic distribution – from 0.54 to 107.09 ppm (Tables 6 and 8). The only other trace element with somewhat higher content in chalcopyrite is Ni – from 186.62 to 209.8 ppm.

Chalcopyrite ($CuFeS_2$): Six LA-ICP-MS analyses of chalcopyrite have been performed as part of the current study. Chalcopyrite is among the less abundant minerals in deposit Sedefche. The samples used in the current study are taken from trenches in Ralitza Dere, near the ground surface. They are affected by partial supergene alteration and chalcopyrite aggregates have notticeable rim of secondary minerals (Fig. 4 and Fig. 5).

Conclusions

The results for the Au content in marcasite, show that its distribution is relatively uneven (values vary by factor of about 2). This is probably caused by its presence as miniature nanoparticles (inclusions), within the crystal lattice of marcasite. The distribution of Ag is even more variable (values vary by factor of about 10). Fleet et al. (1997), conclude that invisible gold in marcasite represents Au removed from ore fluids by chemical absorption at As-rich, Fe-deficient surfaces and incorporated in the solids in metastable solid solution.

It is possible that Au and Ag contents increase towards the cores of collomorph marcasite aggregates, but the low number of measurements are not enough to be conclusive. The Au content in marcasite is low – near the lower detection limit of the LA-ICP-MS device. Still the Ag content in marcasite is notably higher in the very cores of the investigated marcasite aggregates. The distribution of Tl follows pattern opposite of that of Ag – Tl content is higher near the rim and lower in the cores of collomorph marcasite (Tables 2 and 4). Chalcopiryte exhibits very low Au content and somewhat increased content of Ag and Ni.

Acknowledgements.
I would like to express my gratitude and highest esteem towards my advisor Prof. PhD Strashimir Strashimirov for the guidance he provided during preparation of my studies.
I would like to thank Prof. PhD Federica Zaccarini for her help and support for X-ray spectral microanalyses completed in Montanuniversity Leoben.

Table 5.
Results of microprobe point analyses in sample 60a, area 1

Sp. 60a-1	Composition in mass %									mineral
	As	S	Ag	Fe	Zn	Co	Cu	Au	Sb	
P. 1	***0.018***	***34.394***	***0.035***	***30.933***	***0.009***	***0.023***	***34.507***	***0.085***	***0.015***	***chalcopyrite***
P. 2	***0.043***	***34.263***	***-***	***31.143***	***0.029***	***0.049***	***34.535***	***0.023***	***-***	***chalcopyrite***
P. 3	***0.057***	***34.186***	***0.100***	***31.137***	***0.014***	***0.046***	***34.648***	***0.062***	***-***	***chalcopyrite***

Table 6.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 60a-1, area 1

Element [ppm]	60a-1; p.1; (*chalcopyrite*)	60a-1; p.2; (*chalcopyrite*)	60a-1; p.3; (*chalcopyrite*)
Ti	*20.31*	*18.72*	*24.10*
Cr	*37.87*	*29.54*	*34.71*
Mn	*36.59*	*34.90*	*37.42*
Fe	*301577.92*	*302022.27*	*305272.40*
Ni	***186.62***	***203.65***	***192.40***
Cu[3]	*345070*	*345350*	*346480*
Zn	*835.36*	*887.99*	*62.97*
Ga	*3.92*	*4.58*	*3.23*
Ag	***0.54***	***1.93***	***0.89***
Cd	*4.59*	*4.32*	*<2.0833*
Au	***<0.12981***	***<0.16554***	***<0.15209***

[3] - Internal standard of Cu content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Table 7.
Results of microprobe point analyses in sample 60a, area 2

Sp. 60a-2	Composition in mass %									mineral
	As	S	Ag	Fe	Zn	Co	Cu	Au	Cd	
P. 1	**-**	***34.568***	**-**	***31.130***	***0.057***	***0.047***	***34.587***	***0.054***	***0.032***	***chalcopyrite***
P. 2	*0.069*	*0.100*	*0.029*	*37.321*	*3.131*	*0.044*	*10.750*	-	*0.038*	*Fe-hydroxides and malachite*

Table 8.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 60a-1, area 2

Element [ppm]	60a-2; p.1; (*chalcopyrite*)	60a-2; p.1a; (*chalcopyrite*)	60a-2; p.1b; (*chalcopyrite*)
Ti	*21.53*	*20.23*	*24.07*
Cr	*26.71*	*24.43*	*30.61*
Mn	*35.18*	*35.09*	*34.69*
Fe	*292499.17*	*291886.34*	*291152.16*
Ni	***209.80***	***200.17***	***188.18***
Cu[4]	*345870*	*345870*	*345870*
Zn	*1132.41*	*672.40*	*1157.58*
Ga	*2.84*	*1.60*	*1.53*
Ag	***107.09***	***69.73***	***111.64***
Sn	*1.43*	*1.11*	*<1.2843*
Sb	*0.43*	*<0.53605*	*<0.52461*
Au	***<0.14869***	***<0.15882***	***<0.15004***

[4] - Internal standard of Cu content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

References

Atanasov, A. Investigations on the mineral paragenesis and structure of Zvezdel lead-zinc ore field in the eastern Rhodopes. - *Ann. Sofia Univer.* 58, 1, 1965. - 285-323. (in Bulgarian)

Atanasov A., V. Breskovska. Sulfosalts from Zvezdel ore region and their mineral paragenesis. - *Ann. Sofia Univer.*, 57, 1. 1964. - 197-203. (in Bulgarian)

Fleet, M., H. Mumin. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin-Trend gold deposits and laboratory synthesis. - *American Mineralogist*, 82, 1997. -182-193

Georgiev, V. *Metallogeny of the Eastern Rhodopes*. Academic publishing house "Prof. Marin Drinov", Sofia. 2012. – 262 p. (in Bulgarian)

Milev, V., N. Obretenov, V. Georgiev, A. Arizanov, D. Zhelev, I. Bonev, I. Baltov, V. Ivanov. *The gold deposits in Bulgaria*. Publishing house "Zemya 93", Sofia, 2007. – 208 p. (in Bulgarian)

Mladenova, V. Mineralogy and the problem of gold in deposit Sedefche, Eastern Rhodopes; - *Ann. Sofia Univer.* 90, 1, 1998. - 101-130. (in Bulgarian)

Mladenova, V. Precious metals in deposit Sedefche, Eastern Rhodopes. - *Mining works and geology, 1-2*, 1999. - 36-40. (in Bulgarian)

Radonova, R. G., Metasomatic alterations of the rocks in Zvezdel ore region. - *Comptes Rendus BAS, scroll Geochemistry, Mineralogy and Petrography*, 22, 1973. - 123-140. (in Bulgarian)

Strashimirov St., S. Dobrev, St. Stamenov, H. Dragiev. Silver-bearing minerals from the ore body "North" in Sedefche epithermal Au-Ag deposit (Eastern Rhodopes). - *Annual MGU "St. Ivan Rilski", Vol. 48, Part I, Geology and geophysics*. 2005. - 143-148.

Reports of geological surveys; National Geofund:

Cjiflidjanov, R. *Gold-silver deposit Sedefche, Eastern Rhodopes, results of geologic surveys in 1964-1994 with estimation of resourses as of 1.January.1995.* Geofund MEW. 1995. (in Bulgarian)

Dragiev, H., B. Dragieva. *Zvezdel-Pcheloyad ore-field surveying areas "Momchilgrad" and "Asara" – geological report with recalculation of reserves and resources of gold and silver bearing ores in deposit Sedefche as of 01.01.2006.* Geofund MEW. 2006. (in Bulgarian)

Tzekova, V. *Report for undertaken geologic mapping of object Zvezdel-Galenit-Pcheloyad in scale M=1:5000 in 1962-1964.* Geofund MEW. 1965. (in Bulgarian)

The article is reviewed by Assoc. Prof. Stanislav Stoykov and recommended for publication by the Department "Geology and Exploration of Mineral Resources".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

TRACE-ELEMENTS IN SPHALERITE, PYRARGYRITE, PYRITE AND ARSENOPYRITE FROM SILVER-GOLD DEPOSIT SEDEFCHE, EASTERN RHODOPES

Georgi Lyutov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; georgi_lutov@yahoo.com

ABSTRACT. Sedefche is an epithermal type Ag-Au deposit, part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field in the Eastern Rhodopes. The ore mineralization is hosted in volcanic tuffs, affected by intensive hydrothermal alteration. The deposit is located near the ground surface, hence its upper parts are subject to supergene changes. The primary ore minerals are sulfides and sulfosalts. The supergene minerals are typically hydroxides, sulfates, carbonates and arsenates.
Samples from drill cores have been studied through optical microscopy, X-ray spectral micro-analyses and LA-ICP-MS in order to determine trace elements (particularly rare and precious), their content and distribution in various sulfide and sulfosalt minerals from deposit Sedefche.
The analyses established that Au and Ag content in pyrite is somewhat higher than in marcasite. Analysis of arsenopyrite showed that its gold content is the highest among all studied minerals – about 100 times higher than Au content in pyrite. Sphalerite contains significant amounts of Cd and some admixtures of Ga, In and Ag. The distribution of Ag and In in sphalerite is very irregular, while the Ga content is much more consistent. The quantity of Au in sphalerite is low. Pyrargyrite contains some admixtures of Au and more significant amounts of Tl and Se.

Key words: *trace elements, silver-gold deposit, sulfide minerals, sulfosalts, deposit Sedefche*

ЕЛЕМЕНТИ-ПРИМЕСИ В СФАЛЕРИТ, ПИРАРГИРИТ, ПИРИТ И АРСЕНОПИРИТ ОТ СРЕБЪРНО-ЗЛАТНОТО НАХОДИЩЕ СЕДЕФЧЕ, ИЗТОЧНИ РОДОПИ

Георги Лютов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски", 1700 София; georgi_lutov@yahoo.com

РЕЗЮМЕ. Седефче е епитермално Ag-Au находище, част от Звездел-Пчелоядското рудно поле в Източните Родопи. Рудната минерализация е вместена във вулкански туфи, засегнати от силни хидротермални промени. Находището се намира близо до земната повърхност и така горните му части са подложени на хипергенни промени. Първичните рудни минерали са сулфиди и сулфосоли. Хипергенните минерали са предимно хидроксиди, сулфати, карбонати и арсенати.
Проби от сондажни ядки са изследвани с оптичен микроскоп, рентгено-спектрални микроанализи и LA-ICP-MS, за да се определят елементите-примеси (в частност редки и благородни), тяхното съдържание и разпределение в разнообразни сулфидни и сулфосолни минерали от находище Седефче.
Анализите установяват, че съдържанията на Au и Ag в пирита са малко по-високи от тези в марказита. Анализът на арсенопирит показва, че съдържанието на Au в него е най-високо в сравнение с всички останали изследвани минерали – около 100 пъти по-високо отколкото в пирита. Сфалеритът съдържа значителни количества Cd и малко примеси от Ga, In и Ag. Разпределението на Ag и In в сфалерита е много неравномерно, докато съдържанието на Ga е по-постоянно. Количеството на Au в сфалерита е малко. Пираргиритът съдържа малко примеси от Au и по-значителни количества Tl и Se.

Ключови думи: *елементи-примеси, сребърно-златно находище, сулфидни минерали, сулфосоли, находище Седефче*

Introduction

Deposit Sedefche is located in the Eastern Rhodopes, 25 kilometers southeast of the town Momchilgrad, near the village Sedefche. Since 1963 it has been subject of prospecting and surveying and it was initially classified as "ore occurrence" (Atanasov et al., 1964; Atanasov, 1965). Ancient mining works, discovered during the modern geologic surveys confirm the presumption that silver was mined from the deposit since Early Middle Ages and possibly earlier (Tzekova, 1965; Cjiflidjanov, 1995).

Geological setting

Sedefche deposit is located in the southeastern foothills of Strumni Rid Peak, between the towns of Momchilgrad and Krumovgrad, within Kardzhali district. The deposit is part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field in vicinity of Zvezdel paleo-volcano (Georgiev, 2012). The ore field is part of Momchilgrad ore sub-region, which coincides spatially with Momchilgrad depression. The following two structural complexes outcrop in the area of Sedefche deposit.

- Pre-Tertiary metamorphic complex – represented by biotite and two-mica gneiss, amphibolite-biotite gneiss, marble and kyanite-garnet-biotite schists.
- Tertiary volcanogenic-sedimentary cover consists of sedimentary, volcanogenic-sedimentary and volcanic rocks. They are spred uncomformly over the metamorphic rocks. Limestones and sandy-loam rocks are located above metamorhic rocks. Volcanic manifestations in Oligocene (Pg_3), formed acid to intermediate lava plains and dykes (rhyolite,

dacite, andesite). Geologic surveys outlined the following 3 ore bodies with not yet fully understood morphology.

- Northern ore body is located about 200 m north of Sedefche village. It is placed between silificated tuffs, tuff-breccia and andesite. The rocks are kaolinized, sericitized and pyritized. The North ore body is the most promising one for finding Au and Ag according to the results of geologic surveys.

- Southern ore body is located about 500 m west from Sedefche village. The South ore body consists of unevenly silificated limestones, which lie above sandy-loam sediments. Silification has affected the upper parts of the limestones with a thickness up to 6-7 m.

- Ralitza Dere is located in the ravine with the same name, about 300 m NNW from the North ore body. The largest outcrop of metamorphic rocks in the area is in that ravine. The ore body is emplaced within marble, which is heavily silificated. All volcanic rocks in the area, have undergone heavy hydrothermal alterations, such as, silification, sericitization, propylitization (Atanasov, 1965; Radonova, 1973).

Ore minerals

More than 20 ore minerals have been reported in Sedefche deposit (Mladenova, 1998; 1999; Strashimirov et al., 2005; Milev et al., 2007). The most widespread primary ore minerals in the deposit are:

- Sulphides – pyrite, arsenopyrite, sphalerite, acanthite, chalcopyrite and galena.

- Sulfosalts - tennantite-tetrahedrite, proustite, pyrargyrite, miargyrite and others.

The typical supergene ore minerals are: Fe-hydroxides, scorodite and jarosite.

Methods of study

Several polished sections have been prepared from drill core samples, taken from depth of 42 m (Sample 28). In the current study, analyses have been made in sections 28d, 28j and 28e (Fig. 1-6). These sections have been studied with optical reflected-light microscopes Meiji 9430 and Olympus BX60. Several areas and minerals have been designated for further studies by X-Ray microanalyses and LA-ICP-MS, in order to clarify the distribution and content of rare and trace elements and particularly gold.

X-Ray micro-analyses (*microprobe*), described in the current paper, have been carried out in Montanuniversitaet Leoben with the support by Prof. PhD Federica Zaccarini.LA-ICP-MS (*Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy*) studies have been carried out at the Geological Institute of the Bulgarian Academy of Sciences through device Perkin-Elmer SCIEX ELAN DRC-e and LA New Wave Research UP-193; λ=193 nm; laser Ar-F with the support by PhD Dimitrina Dimitrova.

Results of the study

Results from 33 microprobe analyses and 16 LA-ICP-MS analyses of primary sulfide and sulfosalt minerals are presented in this study. Microprobe studies include analyses of pyrite, arsenopyrite, sphalerite, pyrargyrite, miargyrite and stephanite. LA-ICP-MS include analyses of pyrite, sphalerite, arsenopyrite and pyrargyrite. Electron microscope photographs show the location of microprobe point analyses (Fig. 1-6). LA-ICP-MS analyses correspond to the same points as these from microprobe. However, not all points of microprobe analyses have been subject to LA-ICP-MS analyses.

Sphalerite (ZnS): Microprobe analyses established that except the principal elements Zn and S in sphalerite, the mineral contains Fe too, which is not uncommon. Copper content is probably due to finely-dispersed chalcopyrite emulsion within sphalerite crystals, which was observed in some samples under reflected-light microscope. Cd is also present in the investigated sphalerite – its content according to microprobe analyses vary between 0.368 mass% (Table 2) and 0.462 mass % (Table 1). According to LA-ICP-MS analyses, the Cd content in sphalerite is about 2273.89 to 2779.28 ppm in samples 28d-5; p.6 (Table 8) and 28d-4; p.2 (Table 7).

LA-ICP-MS analyses in sphalerite have shown the following contents of precious and rare metals:

The Au content is low – from below 0.29091 ppm (sample 28d-5; p.6; Table 8) to below 0.36363 ppm (sample 28d-4; p.2; Table 7).

The investigated sphalerite also contains Ag. Its content varies from 135.20 ppm (sample 28d-4; p.2; Table 7) to as high as 1583.53 ppm (sample 28d-5; p.6; Table 8). Indium has also been discovered as a trace element in sphalerite, which is not uncommon for this mineral. Indium content varies between 4.54 ppm (sample 28d-4; p.2; Table 7) and 49.92 ppm (sample 28d-5; p.6; Table 8). Its distribution seems to be very uneven. These analyses also show the presence of Ga. Its content in sphalerite varies between 132.8 ppm (sample 28d-4; p.2; Table 7) and 135.51 ppm (sample 28d-5; p.6; Table 8). These values are quite persistent, even though only 2 analyses have been made.

Pyrargyrite (Ag_3SbS_3): The greater part of Ag-bearing sulfosalt minerals from deposit Sedefche, belong to the Sb-rich varieties. Still, microprobe and LA-ICP-MS analyses show that they contain small amounts of As as well, which is not uncommon.

There are As-rich sulfosalt minerals in the deposit, forming standalone phases, but they are much less common. LA- ICP-MS analyses of pyrargyrite (6 analyses) show that the mineral contains significant admixtures of Se, from 218,73 ppm (sample 28j-3; p.2; Table 9) to 908,78 ppm (sample 28d-5; p.1; Table 8).

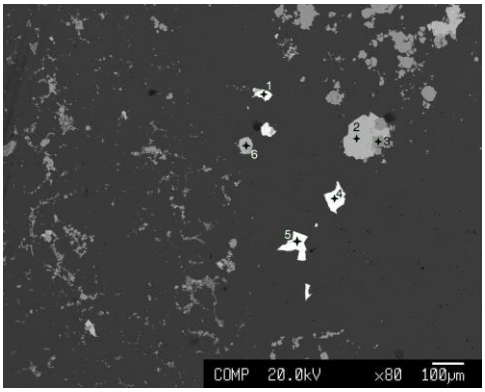


Fig. 1. Sample 28d, area 4. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p.1 – pyrargyrite; p.2 – sphalerite; p.3 – pyrite; p.4-5 – myargyrite; p.6 – sphalerite

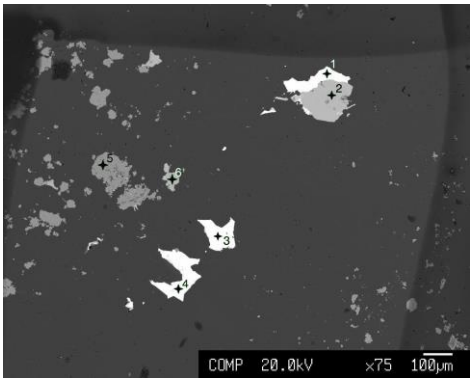


Fig. 2. Sample 28d, area 5. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p.1 and p.4 – pyrargyrite; p.2 and p.6 – sphalerite; p.3 – myargyrite; p.5 – pyrite

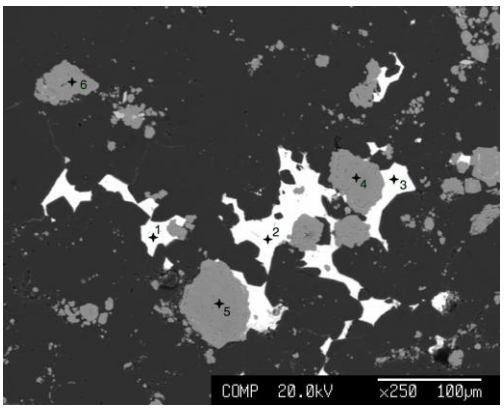


Fig. 3. Sample 28j, area 3. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p.1-3 – pyrargyrite; p.3-6 – pyrite

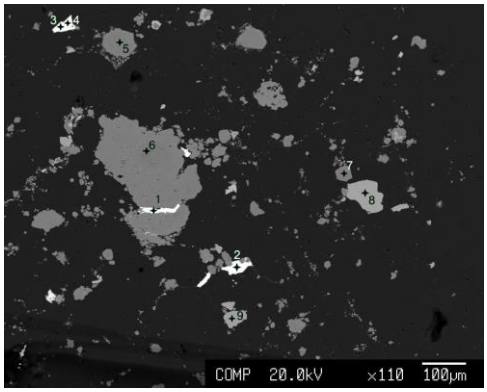


Fig. 4. Sample 28j, area 4. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p.1, 2 and 4 – pyrargyrite; p.3 – stephanite; p.5 and 7 – pyrite; p.6 – marcasite; p.8 and 9 – sphalerite

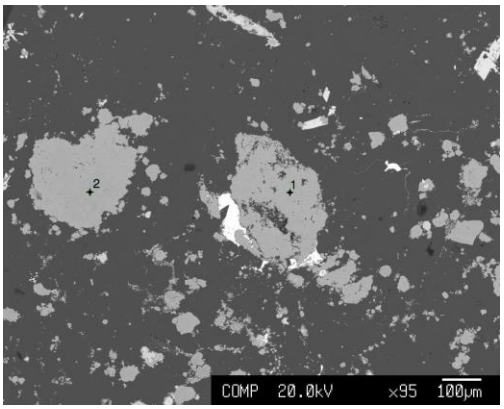


Fig. 5. Sample 28j, area 5. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p. 1 and 2 – pyrite

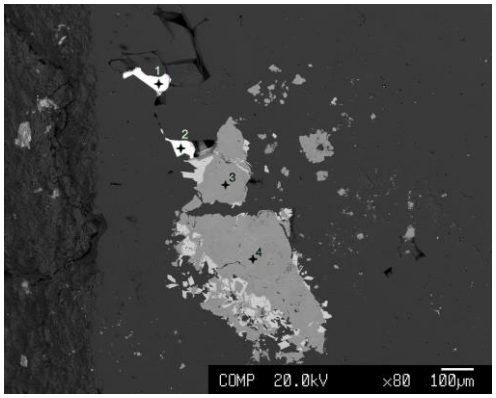


Fig. 6. Sample 28e, area 2. Electron microscope photograph and locations of microprobe point analyses. p. 1-2 – pyrargyrite; p. 3-4 – pyrite with intergrowths of arsenopyrite (brighter gray)

Table 1.
Results of microprobe point analyses in sample 28d, area 4

Sp. 28d-4	Composition in mass %									mineral
	As	S	Fe	Zn	Ag	Cu	Au	Cd	Sb	
P. 1	**0.348**	**17.756**	**0.015**	**0.025**	**64.391**	**0.013**	**0.048**	**-**	**21.154**	***pyrargyrite***
P. 2	**-**	**33.142**	**3.657**	**61.906**	**-**	**-**	**0.128**	**0.462**	**-**	***sphalerite***
P. 3	**0.632**	**53.281**	**46.384**	**0.624**	**0.105**	**0.028**	**0.042**	**0.007**	**0.037**	***pyrite***
P. 4	0.825	21.866	0.024	0.010	36.920	0.116	-	-	40.494	*miargyrite*
P. 5	0.549	21.764	0.029	-	38.832	0.032	-	-	38.523	*miargyrite*
P. 6	-	33.156	3.575	62.191	-	-	-	0.459	-	*sphalerite*

Table 2.
Results of microprobe point analyses in sample 28d, area 5

Sp. 28d-5	Composition in mass %									mineral
	As	S	Fe	Zn	Ag	Cu	Au	Cd	Sb	
P. 1	**0.332**	**17.906**	**0.022**	**0.126**	**61.326**	**0.114**	**-**	**0.013**	**21.719**	***pyrargyrite***
P. 2	0.064	32.757	3.933	60.963	0.064	0.283	-	0.408	0.475	*sphalerite*
P. 3	0.615	21.927	0.004	0.026	42.141	0.006	-	-	39.202	*miargyrite*
P. 4	2.870	17.380	0.001	-	65.558	0.264	-	-	16.730	*pyrargyrite*
P. 5	1.231	52.009	46.690	-	0.083	0.009	-	-	0.009	*pyrite*
P. 6	**0.021**	**32.534**	**3.370**	**61.926**	**-**	**0.024**	**0.059**	**0.368**	**0.040**	***sphalerite***

Table 3.
Results of microprobe point analyses in sample 28j, area 3

Sp. 28j-3	Composition in mass %									mineral
	As	S	Ag	Fe	Zn	Pb	Cu	Au	Sb	
P.1	0.167	17.695	61.210	0.100	0.055	-	0.084	0.041	21.199	*pyrargyrite*
P.2	**0.502**	**17.993**	**60.700**	**0.157**	**-**	**0.004**	**0.011**	**0.116**	**21.227**	***pyrargyrite***
P.3	**0.267**	**17.488**	**62.198**	**0.211**	**0.068**	**0.099**	**0.026**	**-**	**21.704**	***pyrargyrite***
P.4	0.611	52.201	-	46.977	0.013	-	-	-	-	*pyrite*
P.5	**0.802**	**52.238**	**0.018**	**46.812**	**-**	**0.074**	**0.023**	**-**	**0.018**	***pyrite***
P.6	1.775	51.412	0.112	45.019	0.044	0.153	0.057	-	0.687	*pyrite*

Table 4.
Results of microprobe point analyses in sample 28j, area 4

Sp. 28j-4	Composition in mass %									mineral
	As	S	Ag	Fe	Zn	Co	Cu	Au	Sb	
P. 1	**0.509**	**17.759**	**60.768**	**0.180**	**0.131**	**0.004**	**0.039**	**0.075**	**21.587**	***pyrargyrite***
P. 2	**1.163**	**17.924**	**60.636**	**0.799**	**-**	**0.015**	**-**	**0.048**	**16.612**	***pyrargyrite***
P. 3	0.215	13.417	70.701	0.138	0.116	-	2.974	-	7.949	*stephanite?*
P. 4	0.320	17.235	63.605	0.130	0.073	0.010	0.671	-	18.153	*pyrargyrite*
P. 5	4.641	46.565	0.065	46.045	0.021	0.091	0.035	-	0.295	*pyrite*
P. 6	0.350	51.264	0.011	46.475	-	0.092	0.009	-	-	*marcasite*
P. 7	1.150	51.438	0.209	45.544	0.039	0.073	0.009	-	0.176	*pyrite*
P. 8	0.013	33.438	0.110	5.207	59.937	0.005	0.485	-	0.144	*sphalerite*
P. 9	-	33.864	-	3.530	63.120	0.009	0.159	-	0.034	*sphalerite*

Table 5.
Results of microprobe point analyses in sample 28j, area 5

Sp. 28j-5	Composition in mass %										mineral
	As	S	Ag	Fe	Pb	Co	Cu	Au	Cd	Sb	
P. 1	**1,460**	**51,585**	**0,069**	**45,942**	**0,018**	**0,052**	**0,017**	**0,083**	**-**	**0,199**	***pyrite***
P. 2	**0,681**	**51,782**	**0,024**	**46,578**	**-**	**0,070**	**0,011**	**-**	**0,016**	**-**	***pyrite***

Table 6.
Results of microprobe point analyses in sample 28e, area 2

Sp. 28e-2	Composition in mass %									mineral
	As	S	Ag	Fe	Zn	Co	Au	Cd	Sb	
P. 1	0.238	18.174	58.504	-	0.026	-	0.041	-	22.321	*pyrargyrite*
P. 2	0.230	18.202	59.699	0.103	0.027	-	-	-	23.606	*pyrargyrite*
P. 3	**0.730**	**51.162**	**0.009**	**46.651**	**0.031**	**0.063**	**0.041**	**0.002**	**0.286**	***pyrite***
P. 4	**0.295**	**52.843**	**-**	**47.556**	**-**	**0.070**	**0.062**	**0.040**	**-**	***pyrite***

Pyrargyrite contains Au from <0.9 ppm (sample 28j-4; p.1; Table 10) to 4.37 ppm (sample 28d-4; p.1; Table 7). Some analyses of pyrargyrite show increased Tl content – from 3.52 ppm (sample 28j-4; p.1; Table 10) to 64.52 (sample 28j-3; p.3; Table 9).

Pyrite (FeS_2): Seven LA-ICP-MS analyses have been performed for pyrite. The Au content in pyrite, measured with LA-ICP-MS is highly variable - from 0.19 ppm (Sample 28e-2; p.4a; Table 12) to 4.54 ppm (28j-3; p.5; Table 9). Ag content in pyrite is between 38.87 ppm (Sample 28e-2; p.3; Table 12) and 902.83 ppm (Sample 28j-5; p.1; Table 11). The measured Tl content in pyrite is bewtween 6.9 (Sample 28e-2; p.4; Table 12) and 366.99 ppm (28j-5; p.1; Table 11).

Arsenopyrite (FeAsS): Only one LA-ICP-MS analysis of arsenopyrite was made, even though it is widespread mineral in deposit Sedefche.

Table 7.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28d, area 4

Element [ppm]	28d-4; p.1; (*pyrargyrite*)	28d-4; p.2; (*sphalerite*)	28d-4; p.3; (*pyrite*)
Cr	209.22	<24.8633	82.80
Mn	<5.5652	2916.89	1710.18
Fe	<429.5351	41052.38	*463840*[1]
Co	3.49	0.69	16.57
Cu	154.28	816.84	213.02
Zn	261.59	*619060*[2]	8475.86
Ga	<4.5144	**132.80**	<1.9762
As	9915.60	64.73	13362.54
Se	**745.17**	<27.8726	<35.9161
Ag	*643910.00*[2]	**135.20**	**576.90**
Cd	109.70	**2779.28**	22.18
In	<0.41117	**4.54**	0.33
Sn	<5.5317	231.95	9.04
Sb	337564.14	152.09	1096.86
Au	**4.37**	**<0.36363**	**0.99**
Tl	**18.57**	<0.49036	**110.80**
Pb	78.37	11.39	355.28
Bi	41.90	<0.24285	<0.44584

[1] - Internal standard of Fe content, according to data from X-ray spectral microanalysis.
[2] - Internal standard of Zn content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Table 8.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28d, area 5

Element [ppm]	28d-5; p.1; (*pyrargyrite*)	28d-5; p.6; (*sphalerite*)
Mn	<3.7807	2242.92
Fe	<381.2932	35047.97
Cu	406.43	2852.08
Zn	<90.8891	*619260*[1]
Ga	<3.6998	**135.51**
As	3412.76	507.59
Se	**908.78**	<28.1115
Ag	*613260*[2]	**1583.53**
Cd	<5.4247	**2273.89**
In	<0.32139	**49.92**
Sn	<3.9536	677.52
Sb	299083.58	2293.40
Au	**2.89**	**<0.29091**
Hg	3.89	41.92
Pb	<1.5207	85.74

[1] - Internal standard of Zn content, according to data from X-ray spectral microanalysys.
[2] - Internal standard of Ag content, according to data from X-ray spectral microanalysys.

The analysis show Au content of 308.43ppm and Ag content of 218.95 ppm (Sample 28e-2; p.3a; Table 12). No other trace elements of potential economic interest have been found in arsenopyrite.

Table 9.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28j, area 3

Element [ppm]	28j-3; p.2 (*pyrargyrite*)	28j-3; p.3 (*pyrargyrite + pyrite*)	28j-3; p.5 (*pyrite*)
Cr	232.91	305.37	78.14
Fe	<802.4041	31751.71	*468120*[1]
Cu	244.34	299.19	464.67
Zn	81.61	<99.9308	31.00
As	68649.11	93629.88	26697.93
Se	**218.73**	**710.09**	21.19
Ag	***607000.00***[2]	***621980.00***[2]	**612.44**
Sn	7.84	<15.1236	<1.4529
Sb	237486.68	245740.24	2001.50
Au	**<1.3605**	**<2.1636**	**4.54**
Tl	**7.85**	**64.52**	**202.55**
Pb	42.61	149.59	948.86

[1] - Internal standard of Fe content, according to data from X-ray spectral microanalysis.
[2] - Internal standard of Ag content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Table 10.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28j, area 4

Element [ppm]	28j-4; p.1; (*pyrargyrite*)	28j-4; p.2; (*pyrargyrite + pyrite*)
Fe	<536.1793	235604.39
Cu	323.91	656.93
As	1394.44	5387.49
Se	**748.25**	**551.13**
Ag[1]	*607680*	*606360*
Sb	329915.93	307424.45
Au	**<0.90426**	**3.30**
Tl	**3.52**	**33.42**
Pb	9.73	107.60
Bi	6.72	4.98

[1] - Internal standard of Ag content, according to data from X-ray specral microanalysis.

Table 11.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28j, area 5

Element [ppm]	28j-5; p.1; (*pyrite*)	28j-5; p.2; (*pyrite*)
Cr	55.34	51.27
Mn	214.09	1237.84
Fe[1]	*459420*	*465780*
Co	35.44	7.47
Ni	21.02	2.59
Cu	548.10	198.96
Zn	45.30	30.65
As	21118.03	11050.92
Mo	32.94	34.29
Ag	**902.83**	**327.58**
Sb	1649.10	720.67
Au	**4.47**	**2.10**
Tl	**366.99**	**334.44**
Pb	728.01	246.98

[1] - Internal standard of Fe content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Table 12.
Results of LA-ICP-MS point analyses in sample 28e, area 2

Element [ppm]	28e-2; p.3; (*pyrite*)	28e-2; p.3a; (*arseno-pyrite*)	28e-2; p.4; (*pyrite*)	28e-2; p.4a; (*pyrite*)
Cr	46.80	42.60	46.61	46.25
Mn	79.47	45.76	103.98	102.44
Fe[8]	*466510*	*343000*	*475560*	*466510*
Cu	24.51	593.85	29.63	67.17
Zn	30.71	<32.0019	30.74	65.30
As	8682.11	423105.60	7754.23	8761.97
Se	<17.1133	68.93	<12.6481	<15.5031
Mo	64.46	<7.1774	40.24	44.71
Ag	**38.87**	**218.95**	**41.01**	**94.42**
Sb	3073.80	2899.36	1447.94	5893.80
Au	**0.24**	**308.43**	**0.37**	**0.19**
Tl	16.38	10.84	6.90	82.52
Pb	39.47	261.26	55.51	30.32

[8] - Internal standard of Fe content, according to data from X-ray spectral microanalysis.

Conclusions

The measured contents of precious metals (Au and Ag) in pyrite are somewhat higher than these in marcasite (Lyutov, 2016).

The single LA-ICP-MS analysis of arsenopyrite showed that it contains Ag and Au. The measured Au content in arsenopyrite (308.43 ppm) is about 100 times higher than these values in pyrite. Single analysis of arsenopyrite is not enough to establish a trustworthy model of Au distribution, but opens a new field for further studies. According to Fleet et al. (1997), high Au content (up to 3 wt%) in arsenopyrite, corresponds to excess of As and deficiency of Fe in the mineral's formula. Arsenopyrite analyzed in the current study does not exhibit such traits.

Except Cd, sphalerite contains admixtures of Ag, In and Ga. The distributions of Ag and In in sphalerite are very irregular, while the distribution of Ga is much more consistent. The measured Au content in sphalerite is low.

The gold content in pyrargyrite, measured in the current study (0.09-4.37 ppm) is about the same as Au content in pyrite. Pyrargyrite also hosts significant amounts of Se and Tl.

Acknowledgements. I would like to express my gratitude and highest esteem towards my advisor Prof. PhD Strashimir Strashimirov for the guidance he provided during preparation of my studies.

I would like to thank Prof. PhD Federica Zaccarini for her help and support for X-ray spectral microanalyses completed in Montanuniversity Leoben.

References

Atanasov A., V. Breskovska. Sulfosalts from Zvezdel ore region and their mineral paragenesis. - *Ann. Sofia Univer.*, 57, 1. 1964. 197-203. (in Bulgarian)

Atanasov A. Investigations on the mineral paragenesis and structure of Zvezdel lead-zinc ore field in the eastern Rhodopes. - *Ann. Sofia Univer.* 58, 1, 1965. - 285-323. (in Bulgarian)

Fleet, M., Mumin H., Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin-Trend gold deposits and laboratory synthesis. - *American Mineralogist*, 82, 1997. -182-193

Georgiev, V. *Metallogeny of the Eastern Rhodopes*. Academic publishing house "Prof. Marin Drinov", Sofia. 2012. – 262 p. (in Bulgarian)

Lyutov G. Trace-elements in collomorph marcasite and chalcopyrite from silver-gold deposit Sedefche, eastern Rhodopes. *Annual MGU "St. Ivan Rilski", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics*. 2016. In press.

Milev, V., Obretenov, N., Georgiev, V., Arizanov, A., Zhelev, D., Bonev, I., Baltov, I., Ivanov, V. *The gold deposits in Bulgaria*. Publishing house "Zemya 93", Sofia, 2007. – 208 p. (in Bulgarian)

Mladenova V. Mineralogy and the problem of gold in deposit Sedefche, Eastern Rhodopes; *Ann Sofia Univer.* 90, 1, 1998. 101-130. (in Bulgarian)

Mladenova V. Precious metals in deposit Sedefche, Eastern Rhodopes; *Mining works and geology, 1-2*, 1999. 36-40. (in Bulgarian)

Radonova R. G., Metasomatic alterations of the rocks in Zvezdel ore region. *Comptes Rendus BAS, scroll Geochemistry, Mineralogy and Petrography*, 22, 1973. 123-140. (in Bulgarian)

Strashimirov St., S. Dobrev, St. Stamenov, H. Dragiev. Silver-bearing minerals from the ore body "North" in Sedefche epithermal Au-Ag deposit (Eastern Rhodopes); *Annual MGU "St. Ivan Rilski", Vol. 48, Part I, Geology and geophysics*. 2005. 143-148.

Reports of geological surveys; National Geofund:

Dragiev H., B. Dragieva; "Zvezdel-Pcheloyad ore-field surveying areas "Momchilgrad" and "Asara" – geological report with recalculation of reserves and resources of gold and silver bearing ores in deposit Sedefche as of 01.01.2006. Geofund MEW. 2006. (in Bulgarian)

Tzekova V. Report for undertaken geologic mapping of object Zvezdel-Galenit-Pcheloyad in scale M=1:5000 in 1962-1964. Geofund MEW. 1965. (in Bulgarian)

Cjiflidjanov R., Gold-silver deposit Sedefche, Eastern Rhodopes, results of geologic surveys in 1964-1994 with estimation of resourses as of 1.January.1995; Geofund MEW. 1995. (in Bulgarian)

The article is reviewed by Assoc. Prof. Stanislav Stoykov and recommended for publication by the Department "Geology and Exploration of Mineral Resources".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, GeologyandGeophysics, 2016

КАНЬОНЪТ НА РЕКА ПЕТЪР (ПЕТРА, ПЕТРАНИЦА) МЕЖДУ СЕЛАТА ГУБИСЛАВ И МИЛАНОВО (ЗАПАДНА СТАРА ПЛАНИНА)

Борис Вълчев

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

РЕЗЮМЕ. Река Петър (Петра, Петраница), отделяща масива на Лакатнишките скали от планината Козница, оформя типична каньоновидна долина от устието си при махала Самотвор на с. Губислав до с. Миланово. Тя предоставя отлични възможности за наблюдаването и изучаването на разнообразието от геоморфоложки обекти, оформени в триаските карбонатни скали. Настоящата статия има за цел да даде описания на някои от най-типичните геоложки феномени, експонирани в рамките на геотопа – широко разпространените в южната му част скални венци, оформени в скалите на Могилската свита (Оленек-Аниз), както и скалните пирамиди и кукли, изваяни в скалите на Бабинската свита (Аниз). Съгласно класификацията на геоложките феномени, описаните геоморфоложки забележителности попадат в групата на обектите с естетическа стойност, а според оригиналната българска методика за оценка на геоложки феномени те се отнасят към обектите с локално значение.

Ключови думи: река Петър, Западна Стара планина, геоложки феномени.

PETAR (PETRA, PETRANITSA) RIVER CANNYON BETWEEN THE VILLAGES GUBISLAV AND MILANOVO (WESTERN STARA PLANINA MOUNTAIN)

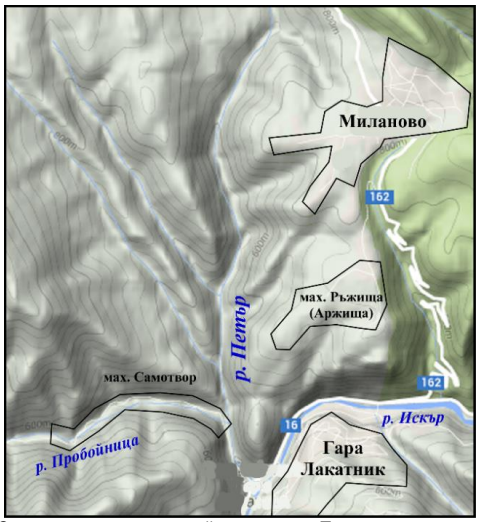
Boris Valchev
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; b_valchev@mgu.bg

ABSTRACT. Petar River (Petra, Petranitsa), separating the Lakatnik Rocks massive from Koznitsa Mountain, forms typical canyon-like valley from its mouth near Samotvor neighborhood of the village of Gubislavto the village of Milanovo. It gives an excellent opportunity for field observation and examination of the diversity of geomorphological sites formed in the Triassic carbonate rocks. The present article aims to describe some of the most typical geological phenomena exposed in the geotope, such as the widely distributed rockcliffs, formed in the rocks of the Mogilska Fm (Olenekian-Anisian) as well as the rock pinnacles and dolls in the Babino Fm (Anisian). According to the classification of the geological phenomena, the geomorphological sites described here are referred to the geosites of aesthetic value, and according to the original Bulgarian methodology for estimation of geological phenomena they correspond to the criteria for geosites of local importance.

Key words: Petar River, Western Stara Planina Mountain, geological phenomena.

Въведение

Долината на р. Петър (Петра, Петраница), която е ляв приток на вливащата се в р. Искър р. Пробойница (фиг. 1), оформя типична каньоновидна долина с посока С-Ю от устието си при махала Самотвор на с. Губислав до западните покрайнини на с. Миланово (табл. I, сн. 1). Южният ѝ участък отделя от запад масива на защитената местност „Лакатнишки скали" от планината Козница. Лакатнишките скали (Айданлийски, 2004) са широко известни, както сред геоложката общественост, така и сред алпинистите, спелеолозите и туристите. За тях е съставено досие (Айданлийски в Желев, Синьовски, 2003[1]) в разработения по проект на МОСВ „Регистър и кадастър на геоложките феномени в Република България" (1999-2003). На фона на тяхната популярност, намиращата се в непосредствена близост долина на р. Петър е известна единствено в средите на алпинистите. В тази връзка настоящата статия има за цел да представи накратко геоложкия строеж на района и да даде описания на някои от най-типичните геоложки феномени (скални венци, скални пирамиди, скални кукли, скални ниши), експонирани в рамките на геотопа.



Фиг. 1. Схематична карта на района на река Петър

[1]Желев, В., Д. Синьовски (ред.). 2003.Регистър и кадастър на геоложкитефеномени в България. 188 досиета в 5 тома. – Национален геофонд,XV-1232 (на български, руски и английскиезик).

Данни за геоложкия строеж на района

Стратиграфия

В строежа на изследвания район участват палеозойски теригеннии интрузивни скали, триаски и юрски теригенни, теригенно-карбонатни и карбонатни седиментни скали, както и кватернерни наслаги (фиг. 2).

Палеозойските теригенни скали се разкриват ограничено югозападно от устието на р. Пробойница. Представени са от *Алевролитово-кварцитна метазадруга* (Иванов, 1970, 1971, 1972; Иванов и др., 1987; Горен Ордовик?) и *Олистостромна единица* (Ангелов и др., 2008; Ордовик). Те са процепени от източния завършек на Петроханския плутон (Горен Карбон), разкриващ се в долината на р. Пробойница.

Триаската система е представена от стандартните за Западните Балканиди групи: Петроханска, Искърска и Мизийска.

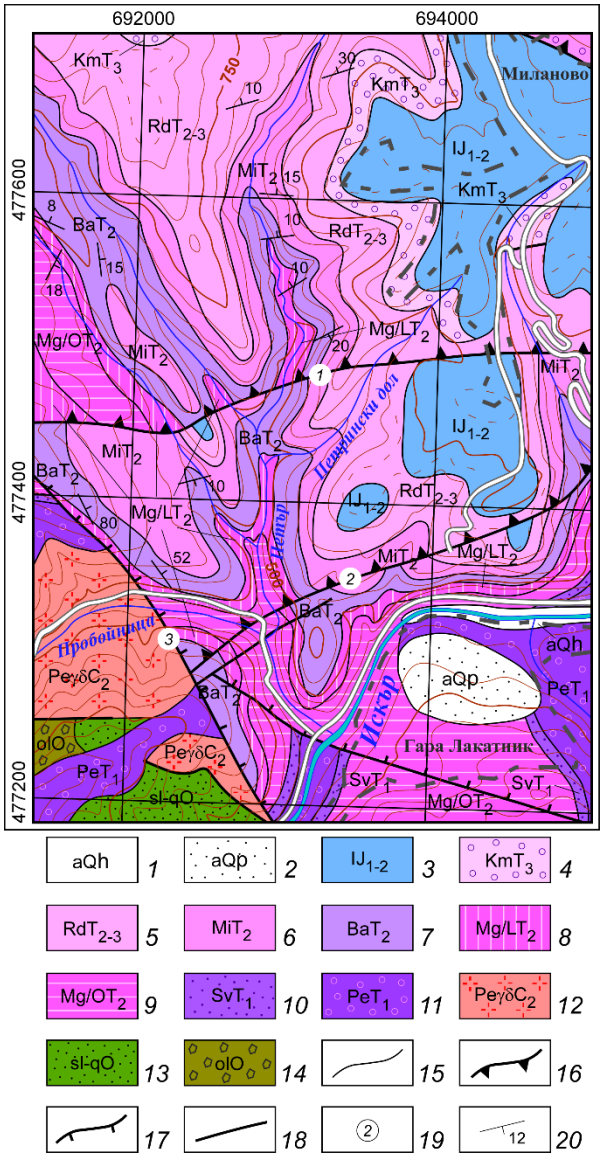
Петроханската теригенна група (Тронков, 1981; Долен Триас) покрива трансгресивно и несъгласно различни нива на палеозойския разрез. Разкрива се под формата на тясно петно ЮЗ от устието на р. Пробойница, както и в СИ край на с. Гара Лакатник.

Искърската карбонатна група (Тронков, 1981; Оленек-Карн) е представена от пет свити: *Свидолска* (Чаталов, 1974; Оленек), *Могилска* (Ассерето и др., 1983; Оленек-Аниз) с два члена (*Оплетненски,* въведен като *Оплетненска свита* от Тронков, 1968 и *Лакатнишки,* въведен като *Лакатнишка свита* от Тронков, 1968), *Бабинска* (Тронков, 1968; Аниз), *Милановска* (Тронков, 1968; Ладин) и *Русиновделска* (Тронков, 1968; Ладин-Карн). С изключение на първата, която следва с бърз литоложки преход над Петроханската група и оформя три тесни ивици в района на с. Гара Лакатник, останалите свити се разкриват на широки площи в изследвания район, следвайки една над друга с рязък или бърз литоложки преход.

Мизийската група (Чемберски и др., 1974) в района включва само *Комщицката свита* (Tronkov, 1969; Карн-Нор), следваща с рязък литоложки контакт над Русиновделската свита и разкриваща се като тясна ивица в западните и южните покрайнини на с. Милановo.

Юрската система е развита пространствено в района на с. Милановo. Разполага се трансгресивно върху различни нива на триаския разрез. Представена е от въведените от Сапунов (в Сапунов и др., 1967) *Костинска* (Хетанж-Синемур) и *Озировска* (Синемур-Аален) свита.

Кватернерната система включва *алувиални* наслаги с плейстоценска (в надзаливните тераси при с. Гара Лакатник) и холоценска (в долината на р. Искър, северно от селото) възраст.



Фиг. 2. Геоложка карта на района на река Петър (по Ангелов и др., 2009; с изменения)
1-2–Кватернер: 1 – алувий (Холоцен); 2 – алувий (Плейстоцен); 3 – Юра: Озировска (Синемур-Аален)и Костинска (Хетанж-Синемур) свита; 4-11- Триас: 4 – Комщицка свита (Карн-Нор); 5 – Русиновделска свита (Ладин-Карн); 6 – Милановска свита (Ладин); 7 – Бабинска свита (Аниз); 8-9 – Могилска свита (Оленек-Аниз): 8 – Лакатнишки член; 9 – Оплетненски член; 10 – Свидолска свита (Оленек); 11 – Петроханскатеригенна група (Долен Триас); 12 – Петроханскиплутон (Горен Карбон); 13-14 – Ордовик: 13 - алевролитово-кварцитоваметазадруга (Горен Ордовик?); 14 – олистростромна единица (Ордовик); 15 – литостратиграфска граница; 16 – възсед; 17 - разсед; 18 – разлом с неустановен характер; 19 – разломи: 1 – Аржищенскивъзсед, 2 – Радовврръшкивъзсед, 3 – Пребойнишки разлом; 20 –слоестост.

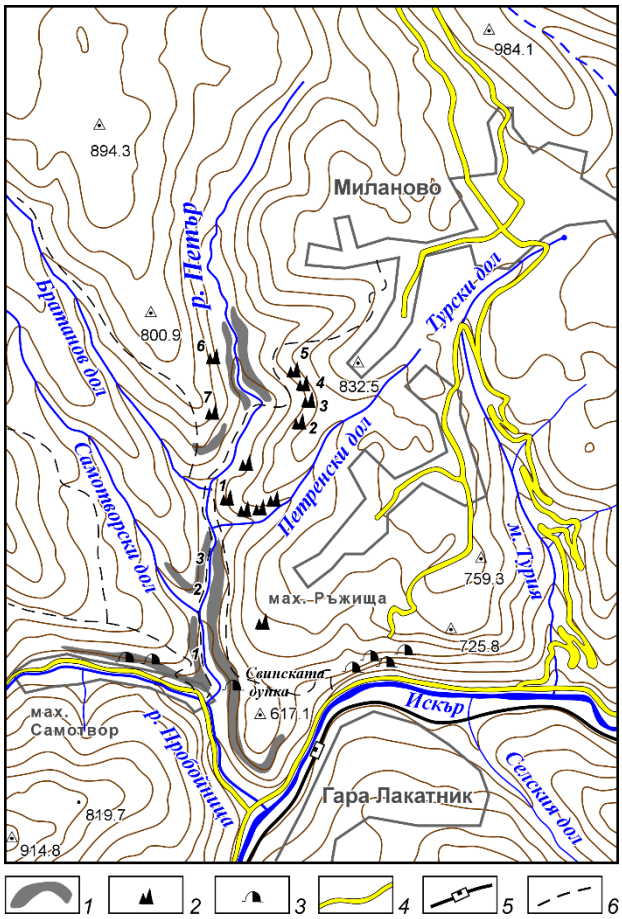
Тектоника

Районът на река Петър попада в обхвата на Берковската единица на Западнобалканската зона. В рамките на изследваната площ попадат Милановската синклинала, оформена по триаските седиментни скали, както и Аржищенският и Радовврръшкият възсед (с посока ЗЮЗ-ИСИ) и Пребойнишкият разлом (посока СЗ-ЮИ), описани подробно от Тронков (1963, 1965).

Характеристика на геоложките феномени

Описаните в настоящата статия геоложки феномени (фиг. 3) се отнасят към групата на обектите с естетическа стойност (клас геоморфоложки) – скални венци, скални пирамиди, скални кукли, скални ниши.

Скални венци.Оформени са в субхоризонталните масивни варовици на Лакатнишкия член на Могилската свита. Наблюдават се главно в южната част на геотопа. Най-дългият от тях (табл. I, сн. 2, 3) се проследява непрекъснато по левия склон на долината от устието на р. Петър (на около 250 m СИ от него се намира отворът на пещерата Свинската дупка - табл. I, сн. 4, 5) до вливането в нея на Петренски дол, като достига дължина 1,2 km. Непосредствено на изток от вливането на десния приток Самотворски дол под скалите на Лакатнишкия член се разкриват и част от тези на Оплетненския, като по този начин е оформена впечатляваща скална стена с височина над 60 m(табл. I, сн. 7).



Фиг. 3. Местоположение на геоложките феномени в долината на р. Петър
1 – скални венци (1 – Главниокамик; 2 – Академишки скали; 3 – Биляро или местността Голямата ниша); 2 – скални пирамиди и скални кукли (1 – Гюлемо; 2 – Кьоравата кукла; 3 – Чикеро; 4 – Средната кукла; 5 – Пандова кукла; 6 – Двата гюбли; 7 – Викалецо); 3 – пещери; 4 – шосе; 5 – железопътна линия; 6 – пътека.

Десният склон на долината също предлага интересни разкрития. Скалният венец в участъка между устието на р. Петър и вливането на Самотворски дол (табл. I, сн. 6, 8, 9) е известен като Главниокамик (вж. *Топографска карта на землището на село Миланово (Осиково)* и е с дължина 450 m. Разположен е на височина 50-60 m над нивото на реката, която се спуска плавно на юг (наклон 10-12°). На север от устието на Самотворски дол, до устието на Петрински дол, скалният венец може да се раздели на два участъка. Южният, непосредствено на север от устието на Самотворски дол, е наричан от алпинистите Академишки скали (табл. I, сн. 10, 11) и е използван за тренировъчни цели. В най-южната си част той се издига на около 50 m над нивото на р. Петър. Северният участък на венеца е наклонен полегато на север и постепенно се спуска до нивото на реката (табл. I, сн. 12). Тук, в местността Голямата ниша, се намира и най-тясната част от долината (10 m), носеща белезите на типичен каньон (табл. I, сн. 13, 14).

По-слабо изразени венци могат да се наблюдават в десния склон на р. Петър,непосредствено на север от вливането на десния приток Братанов дол (табл. II, сн. 1) и по двата склона северно от помпената станция на с. Миланово, където долината отново се стеснява и гледана от югоизток, наподобява голяма порта (табл. II, сн. 2).

Оформянето на скалните венци е литоложки и тектонски предопределено – първичната напуканост на устойчивите на влиянието на екзогенните процеси субхоризонтални дебелопластови до масивни карбонатни скали подпомага отцепването на скални блокове по две системи от субвертикални пукнатини, като за дооформянето на венците са допринесли и карстовите процеси.

Скални пирамиди и скални кукли.Изваяни са в скалите на Бабинската свита и се срещат предимно в северната част на геотопа (северно от вливането на левия приток Петренски дол). Някои от тях имат наименования, дадени им от местното население (*Топографска карта на* ...). Непосредствено на север от устието на Петренски дол, в левия склон на р. Петър,се наблюдава Гюлемо - единична скална пирамида (скален обелиск) с височина над 5 m, отделена от масивен скален блок (табл. II, сн. 3). Наблюдаван от различни гледни точки, последният демонстрира разнообразна морфология.На 100 m С от тази композиция, отново в левия склон, е оформена недостъпна единична безименна скална пирамида(табл. II, сн. 4). Нейната височина е около 5 m, като тя не е напълно отделена от скалния масив.Още по на север, в сравнително полегатия ляв склон източно от помпената станция на с. Миланово, са разположени амфитеатрално 4 скални композиции (табл. II, сн. 5-8) - Кьоравата кукла,Чикеро, Средната кукла и Пандова кукла (от юг на север). Най-впечатляваща е последната – от масивна скална основа вертикално нагоре се издигат няколко разклонения. Западно от тези кукли, в десния склон на долината, са оформени двойка пирамиди, наричани Двата гюбли (табл. II, сн. 9), както и единична пирамида, свързана със скалата Викалецо (табл. II, сн. 10). Безименни пирамиди и кукли се наблюдават и в десния склон на Петренски дол (табл. II, сн. 11), както и на 600 m северно от м. Осиково градище (кота 617.1 на фиг. 3 - табл. II, сн. 12).

Скалните пирамиди и кукли са образувани в резултат на карстификацията на тънко- и среднопластовите варовици на Бабинската свита, като за това е допринесло и субхоризонталното им положение.

Скални ниши.Оформени са в долните нива на Лакатнишкия член. Най-известна е Голямата ниша (табл. II, сн. 13, 14), намираща се в десния склон на 920 m С от устието на р. Петър. Височината ѝ достига до 3 m, дължината ѝ надхвърля 20 m, а дълбочината ѝ достига 6 m. Северната ѝ част е разположена на 2-3 m над нивото на реката и е лесно достъпна. По-малки ниши могат да се наблюдават в участъка Академишки скали (табл. II, сн. 15), но те са достъпни единствено за алпинистите.

При направената експертна оценка, следвайки оригиналната българска методика за оценяване на геоложки феномени (Синьовски и др., 2002), е констатирано, че описаните в настоящата статия обекти са с локално значение.

Заключение

Описаните в настоящата статия геоложки феномени се явяват естествено допълнение към представите за геоморфоложкото разнообразие в тази част от Западна Стара планина. Добрите транспортни комуникации (шосето София-Мездра и железопътната лития по Искърския пролом от изток, пътя за с. Губислав и хижа Пробойница от юг) улесняват значително достъпа до долината на р. Петър. За популяризирането на експонираните в нея геоложки феномени, обаче, е необходимо разработването на интерпретативен геоложки маршрут и поставянето на информационни табла с геоложка информация, тъй като до момента такава липсва. Това ще доведе до значително увеличаване на интереса към този район (до момента изразяващ се единствено в предоставянето на база за обучение на алпинисти), а оттук и естественото му интегриране към изключително популярните Лакатнишки скали.

Благодарности. Изказвам благодарност на рецензента проф. д-р Венелин Желев за направените препоръки към ръкописа на статията.

Литература

Айданлийски, Г. Лакатнишки скали, с. Миланово, Софийска област. – *Геол. и мин. рес., 5*, 2004. - 20-25.

Ангелов, В., М. Антонов, С. Герджиков, П. Петров, Х. Киселинов, Г. Айданлийски, В. Вълев. *Обяснителна записка към геоложката карта на Република България в М 1:50 000, картен лист К-34-35-Г (Лакатник).* МОСВ, Българска национална геоложка служба, С., Унискорп ООД, 2008. - 92 с.

Ангелов, В., М. Антонов, С. Герджиков, П. Петров, Х. Киселинов, Г. Айданлийски, В. Вълев. *Геоложка карта на Република България в М 1:50 000, картен лист К-34-35-Г (Лакатник).* МОСВ, Българска национална геоложка служба, С., Апис 50 ООД, 2009.

Ассерето, Р., Г. Чаталов, Д. Тронков. Могильская свита (нижний-среднийтриас) в Западной Болгарии. – *Geol.Balcanica.,13, 6, 1983. - 25-27.*

Иванов, Ж. Върху характера и последователността на ранните деформации в старопалеозойските скали на Стара планина между долината на р. Искър и Етрополския проход. – *Изв. Геол. инст., сер. геотект., 19*, 1970. - 25-59.

Иванов, Ж. О присуствии серпентинизированых ультрабазитов в долине р. Искыр севернее жд станции Бов. –*Докл. БАН,23*, 1, 1971. – 87-90.

Иванов, Ж. Строеж на старопалеозойските скали между гарите Бов и Лакатник. – *Год. Соф. унив., 64*, кн. 1 – Геология, 1972. – 83-95.

Иванов, Ж., К. Колчева, С. Московски, Д. Димов. За особеностите и характера на „диабазово-филитоидната формация". – *Сп. Бълг. геол. д-во, 48*, 2,1987. – 1-24.

Сапунов, И., П. Чумаченко, В. Шопов. Биостратиграфия на долноюрските скали при с. Комщица, Софийско (Западни Балканиди). - *Изв. геол. инст., сер. стратигр. и литол., 16*, 1967. - 125-143.

Синьовски, Д., В. Желев, М. Антонов, С. Джуранов, З. Илиев, Д. Вангелов, Г. Айданлийски, П. Петров, Х. Василев. Метод за оценка на геоложкифеномени. – *IIМеждународна конференция SGEM, Варна*, 2002. - 25-33.

Топографска карта на землището на село Миланово (Осиково). - http://milanovo-sf.bashtina.org/?page_id=180.

Тронков, Д. Характер на старокимерския структурен етаж, тип и време на старокимерските тектонски движения в Северозападна България. –*Тр. Геол. Б-я, сер. стратигр. и тект., 5*, 1963. – 171-196.

Тронков, Д. Тектонски строеж и анализ на структурите на Врачанския блок от Западна Стара планина. Пластична деформация в съседство с разломните равнини. - *Тр. геол. Б-я, сер. стратигр. и тект., 6*, 1965. - 217-250.

Тронков, Д. Границата долен триас – среден триас в България. – *Изв. Геол. инст., сер. палеонт., 17*; 1968. - 113-131.

Тронков, Д. Стратиграфиятриасовойсистемы в части Западного Средногорья (Западная Болгария). – *Geol.Balc., 11,* 1; 1981. - 3-20.

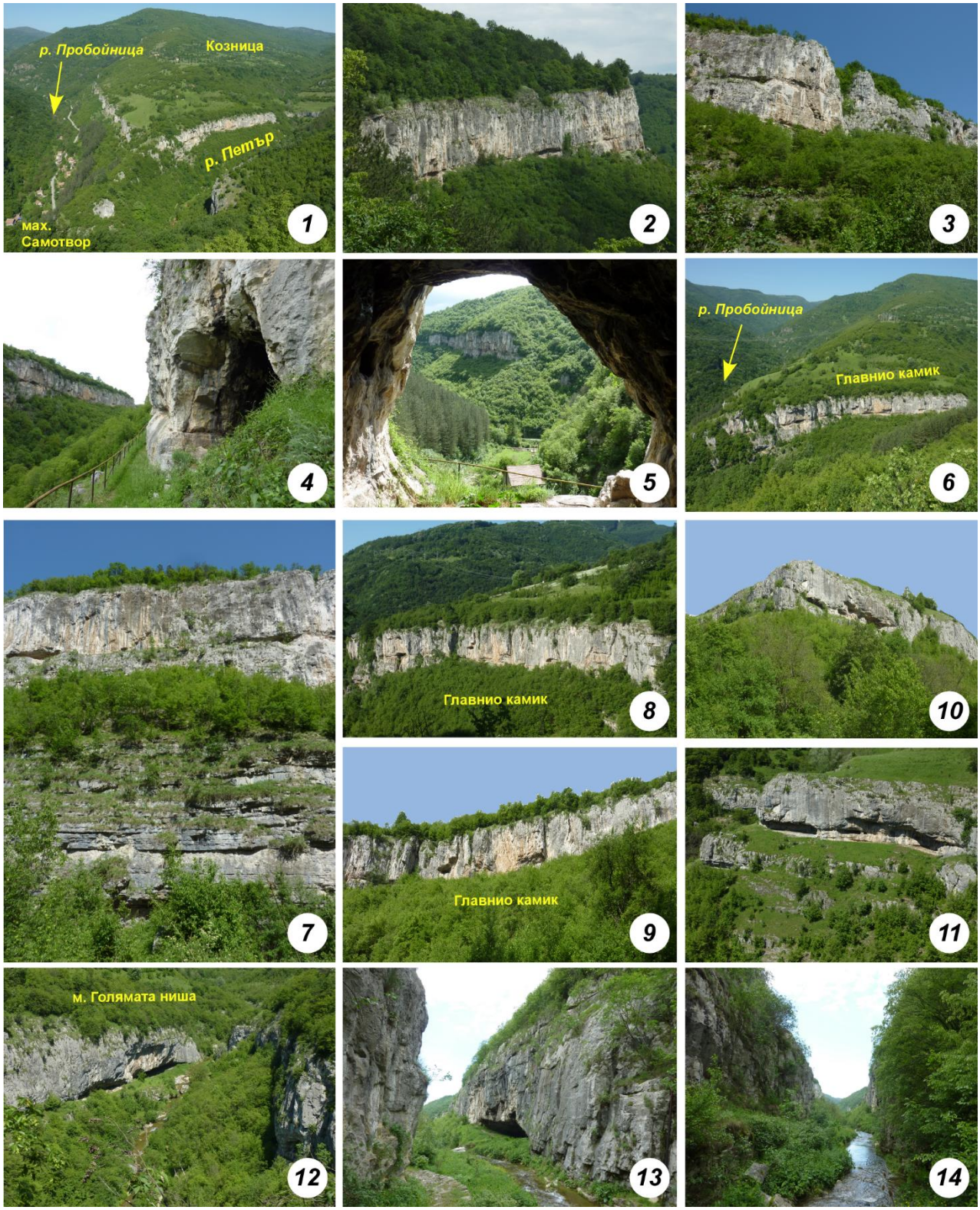
Чаталов, Г. Фации в Свидольской свите (нижнийтриас) Тетевенского антиклинория. –*Докл. БАН,27, 2, 1974. - 239-242.*

Чемберски, Г., Я. Вапцарова, И. Монахов. Литостратиграфия на пъстроцветните теригенно-карбонатни и карбонатни седименти, свързани с триаса, разкрити при дълбокото сондиране в СЗ и ЦС България. – *Год. ДСО "Геол. проучв"., 20, 1974. - 327-341.*

Tronkov, D. Neue Angaben über das Alter der bunten Gesteinedes "Räts" (obereTrias) in Bulgarien. –*C. R. Acad. Bulg. Sci., 21, 4, 1969. - 363-366.*

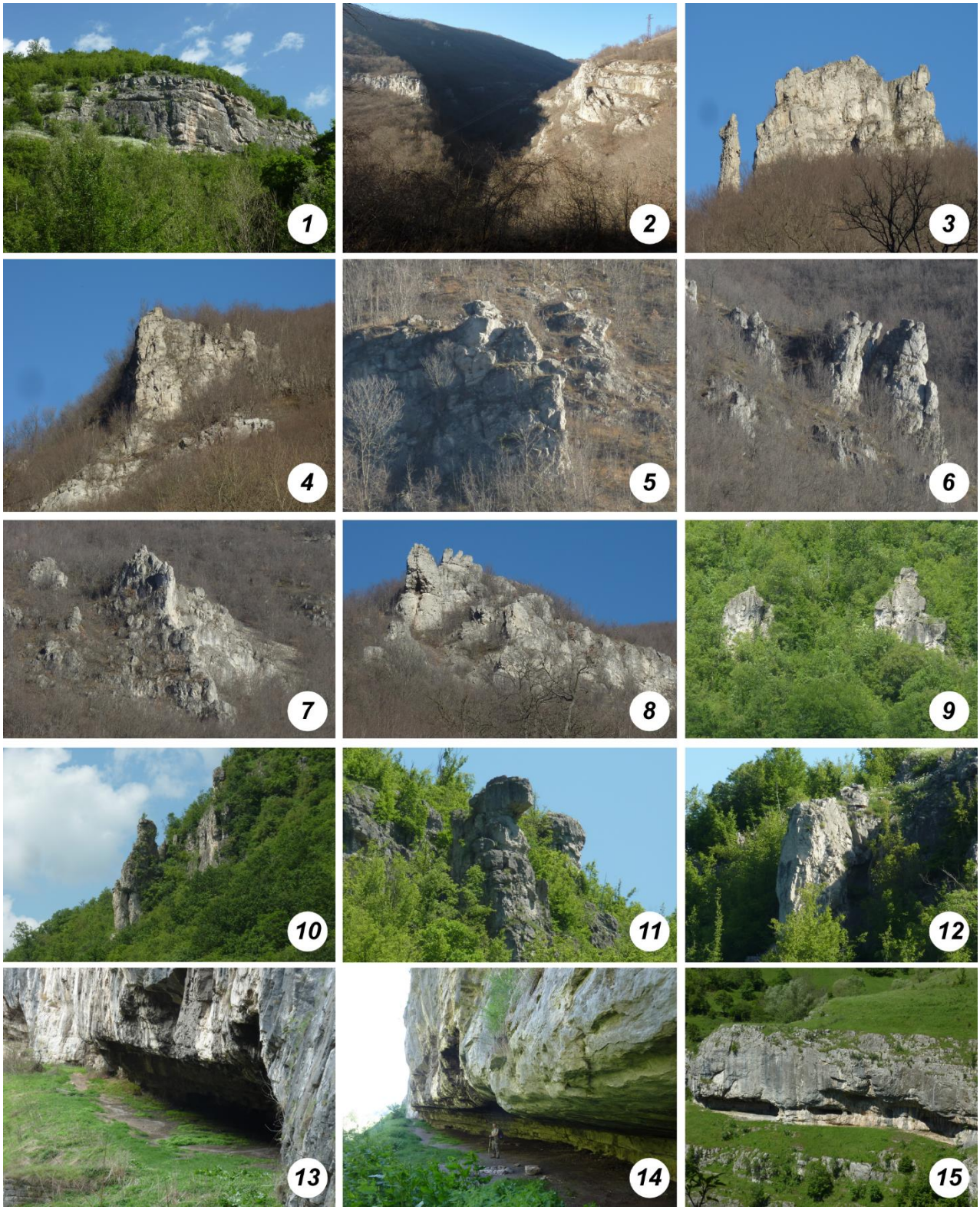
Статията е рецензирана от проф. д-р Венелин Желев и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и геоинформатика".

ТАБЛИЦА I



1 – общ изглед на реките Пробойница и Петър (поглед от м. Осиково градище); 2, 3 – скалният венец по левия склон на р. Петър (2 – при устието на реката, 3 – в района на пещерата Свинската дупка); 4 – поглед от юг към входа на пещерата Свинската дупка (на заден план е Главнио камик); 5 – изглед от входа на пещерата; 6, 8, 9 – изгледи на скалния венец Главнио камик, съответно от югоизток (м. Осиково градище), изток и североизток; 7–скална стена с височина над 60 m източно от устието на Самотворски дол; 10, 11 – скалният венец Академишки скали (10 – поглед от юг, 11 – поглед от изток); 12 – скалният венец в м. Голямата ниша (поглед от югоизток); 13, 14 – най-теснният участък в долината на р. Петър в м. Голямата ниша, притежаващ белезите на типичен каньон.

ТАБЛИЦА II



1 – скален венец непосредствено северно от вливането на Братанов дол; 2 – „Портата“ – скални венци северно от помпената станция на с. Миланово; 3 – Гюлемо – скален обелиск и масивен скален блок непосредствено северно от устието на Петренски дол; 4 – скална пирамида в левия склон на долината на р. Петра, северно от Гюлемо; 5-8 – скални кукли източно от помпената станция на с. Миланово (5 – Кьоравата кукла, 6 – Чикеро, 7 – Средната кукла, 8 – Пандова кукла); 9 – Двата гюбли – скални пирамиди северно от „Портата“; 10 – скална пирамида и скала Викалецо; 11 – скални кукли в десния склон на долината на Петренски дол; 12 – скална пирамида на 600 m северно от м. Осиково градище; 13, 14 – Голямата ниша в основата на скалния венец в едноименната местност; 15 – скални ниши в основата на скалния венец Академишки скали при устието на Самотворски дол.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

МИНЕРАЛЕН СЪСТАВ НА ЯСПИСИ ОТ ИЗТОЧНИТЕ РОДОПИ

Руслан И. Костов, Радостин Паздеров, Любомир Михайлов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; rikostov@yahoo.com; rpazderov@abv.bg; lyubomihaylov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Описани са със съответния им минерален състав 8 коренни проявления на яспис, както и над 20-на алувиални и делувиални ясписови и ясписоподобни проявления в отделни части на Източните Родопи. По състав и по цвят се отделят три основни групи ясписи: червени ясписи с примес от хематит, жълти (светлокафяви) ясписи с примес от гьотит и зелени ясписи с примес от селадонит. Въз основа на някои съотношения на интензитета на рентгеновските отражения при кварца се отделят главно две групи образци: съществено микрозърнести кварц-съдържащи и съществено халцедон-съдържащи ясписи. По отношение на геоложката позиция и възраст, находките се отнасят към първия, втория и третия стадий (задруги) на среднокиселия вулканизъм в Източните Родопи с горноеоценска и олигоценска възрасти.

Ключови думи: яспис, кварц, минералогия, Източни Родопи

MINERAL COMPOSITION OF JASPER FROM THE EASTERN RHODOPES

Ruslan I. Kostov, Radostin Pazderov, Lyubomir Michaylov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; rikostov@yahoo.com; rpazderov@abv.bg; lyubomihaylov@abv.bg

ABSTRACT. Listed with their respective mineral composition are 8 occurrences of jasper, as well as over 20 alluvial and diluvial jasper and jasper-like bearing placers in different parts of the Eastern Rhodopes. According to their composition and colour the jaspers are separated in three main groups: red jasper with an admixture of hematite, yellow (pale brown) jasper with an admixture of goethite and green jasper with an admixture of celadonite. Based on certain ratios of the intensity of some X-ray reflections in the quartz, two groups of specimens are separated: substantially microcrystalline quartz-bearing and substantially chalcedony-bearing jaspers. In terms of geological position and age, the findings are related to the first, second and third stage of the medium acid volcanism in the Eastern Rhodopes with corresponding Upper Eocene and Oligocene ages.

Key words: jasper, quartz, mineralogy, Eastern Rhodopes

Увод

Ясписите и сродните образувания са предимно кварц-съдържащи скали с разнообразно оцветяване, текстура и генезис (за някои от минераложките класификации на ясписите, които не са приети в международен аспект вж. Костов, 2006; Kostov, 2010). Те са разпространени в България в две основни зони: в Средногорието и в Източните Родопи (Атанасов и Йорданов, 1986; Петрусенко и Костов, 1992). В периода 2015-2016 година, от авторите на статията са проведени редица проучвателни маршрути в Пловдивска, Хасковска и Кърджалийска области, с оглед на намиране на разкрития и разсипи, както и събиране на проби от яспис от някои известни, както и нови за района на Източните Родопи проявления.

Проби и методи

Посетени са около 30 разкрития и разсипи на ясписи (събрани са над 200 проби за различни изследвания и за музейни експозиции) в следните 5 региона на Източните Родопи, със съответни проявления, изброени от запад на изток и от север на юг (при речните долини със съответните притоци): 1 – източна и северна част на Източните Родопи (Буково и Татарево); 2 – по поречието на р. Арда (Лисиците, Студен кладенец, Маджаре, Пчеларе, Арката и Долно черковище); 3 – по поречието на р. Върбица (Сушево, Момчилград, Чуково, Прогрес, Пиявец, Юнаци и Каменец); 4 – по поречието на р. Бюйюкдере (Бойник, Дериндере, Девинци, Нановица, Неофит Бозвелиево и Кос); 5 – по поречието на р. Крумовица (Морянци, Джанка, Горна кула, Пазарци и Звездел). Като се изключи известният от литературата с ясписи обширен ареал около Момчилград и с. Чуково в Кърджалийска област (Пожаревски, 1989; Илиев, 1996; Тодорова, Василева, 2007), от където в редица музеи има образци, в двадесетина от посочените локалитети ясписите се описват за пръв път, включително с коренни находки. Ясписът, във вид на артефакти, е отбелязан и от някои праисторически селища в района (Костов, 2007), а по-време на теренните проучвания са намерени и нови такива с различен цвят. Генетичните аспекти в произхода на ясписите са анализирани от редица изследователи (обзори в: Барсанов и Яковлева, 1978; Киевленко и Сенкевич, 1983; Костов, 2003; Campos-Venuti, 2012).

За определяне на минералния състав на ясписите е извършен рентгенофазов анализ на 41 прахови проби на апарат Bruker D2 Phaser с компютърна база данни Diffrac.eva V4.0 (Crystallography Open Database REV89244/2013.10.11) в диапазона на 2Θ 5-70° при режим Cu/Ni, 10 mA, 30 kV и t=0.5 s (Научно-изследователска лаборатория по Рентгенова дифракция към Лабораторен център за изследване на веществен състав и структури на природни и синтезирани материали – МГУ). Извършени са микроскопски наблюдения и диагностика на пробите (микроскопи Meiji; Leitz с приставка Olympus C5060).

Описание на проявленията на яспис

Геологията на Източните Родопи е описана в множество публикации и картировки (Горанов, 1960; Иванов, 1960; Боянов и др., 1995; Горанов и др., 1995; Кожухаров и др., 1995; Йорданов и др., 2008; Саров и др., 2008; Георгиев, 2012). Всичките установени коренни и алувиални находки на ясписи се свързват с прояви на среднокиселия (задруги на първи, втори и трети) вулканизъм със съответни горноеоценска и олигоценска възрасти.

Буково (Bu). В района на село Буково се установи едно коренно находище на светлокафяв яспис северно от селището и прояви на делувиален червен яспис в югозападна посока. Вместващите скали са туфогенни материали, свързани с първия среднокисел вулканизъм.

Татарево (Ta). В района източно от селото, срещу височината Хисар, се намират червени ясписи с делувиална и алувиална природа. Локалните, подхранващи, проявлението скали са свързани с материали на втория среднокисел вулканизъм.

Лисиците (Li). Източно от селището, по десния бряг на река Арда се откриват алувиални късове от предмно жълт яспис. Във височина на едно от деретата беше установено коренно разкритие на яспис и опал със светлокафяв цвят. Локалните подхранващи проявлението скали са свързани с материали на втория среднокисел вулканизъм.

Студен кладенец (Sk) и Долно черковище (Dc). Двете проявления са обединени поради наличие на ясписоподобни ивичести (тъмночервено до кафяво и зелено) декоративни материали (ясписоподобни скали), които се срещат в речните тераси по поречието на река Арда. Локалните подхранващи проявлението скали са свързани с материали на втория среднокисел вулканизъм.

Маджаре (Md), Пчеларе (Pc) и Арката (Ar). Трите проявления се свързват с горното, долното течение и устието на река Бюйюкдере, при нейното вливане в река Арда (нейн ляв приток). Вместващите и подхранващи проявленията скали са туфогенни материали, свързани с втория среднокисел вулканизъм.

Сушево (Su) и Момчилград (Mo). В конкретния случай се описват алувиални находки на яспис от дерета, свързани с десни притоци на река Върбица при съответните селища. От първото проявление са известни зелени ясписи, включително и хелиотроп, а от второто и кафяви такива. Подхранващи проявленията скали са туфогенни материали, свързани с третия среднокисел вулканизъм.

Чуково (Ch), Прогрес (Pr) и Пиявец (Pi). Районът на село Чуково (с новото село Прогрес на запад и бивша махала Пиявец на изток) е сред най-забележителните по цветовото разнообразие и текстурната красота на ясписи в България. Те са събирани главно по река Чуковска и нейните притоци. Основните цветове са зелено, тъмножълто (светлокафяво) и червено, като се срещат едноцветни, двуцветни и трицветни ясписи, както и такива от пейзажен и брокатен тип. Вместващите и подхранващи проявленията скали са туфогенни материали, свързани с третия среднокисел вулканизъм (фиг. 1).

Юнаци (Yu). С това название, свързано с една махала южно от с. Чуково, е описана широка зона на проява на зелен яспис (фиг. 2) в долината по течението на Токмаклъдере. Вместващите проявлението скали са туфогенни материали, също така свързани с третия среднокисел вулканизъм.

Каменец (Ka). Описани са коренни, делувиални и алувиални по генезис ясписи в близост до село Каменец. По цвят съответстват на трите основни тона, познати от ареала на село Чуково. Вместващите и подхранващи находките на яспис скали са туфогенни материали, също така свързани с третия среднокисел вулканизъм.

Бойник (Bo) и Дериндере (Dd). Проявленията се свързват съответно с коренни и разсипни проявление на ясписи в северозападната част на Бойник планина, недалеч от язовир Студен кладенец. Едно от коренните проявления е представено от голяма тъмножълта до светлокафява жила с дебелина 1,60 m, разкритие от около 6 m и посока ~140° (фиг. 3). Наблизо е намерен и зелен яспис. В разсипното проявление се срещат късове от яспис с различен цвят. Вместващите и подхранващи находките на яспис скали са туфогенни материали, свързани с втория среднокисел вулканизъм.

Девинци (De) и Нановица (Na). Двете проявления се свързват с алувиални находки на ясписи с различен цвят по поречието на река Бюйюкдере. Вторият локалитет е даден в опис на ясписовите проявления в Източните Родопи (Тодорова, Василева, 2007). Подхранващият алувиалните ясписи терен е разнообразен, но с голяма вероятност това са скали от задругите на втория среднокисел вулканизъм.

Неофит Бозвелиево (Ne). Представено е от коренни и делувиален тип зелени, жълти и червени ясписи с разнообразно едноцветно, двуцветно и трицветно оцветяване (фиг. 4). Вместващите и подхранващите находки на яспис скали са агломератови туфогенни материали, свързани с втория среднокисел вулканизъм.

Кос (Ko). Представено е от алувиален тип червени ясписи в горното течение на река Бюйюкдере при едноименното село. Подхранващи находките на яспис скали са най-вероятно туфогенни материали, свързани с третия среднокисел вулканизъм.

Морянци (Mo). Представено е от алувиален тип червени и кафяви ясписи по река Дюшун дере преди нейното вливане в река Крумовица. Има широк ареал на подхранване, но вероятно с превес на скалите от първия среднокисел вулканизъм.

Джанка (Dj). Представено е от коренен тип червени ясписоподобни жили по долината на река Дюшун дере. В района се отбелязват и зелени ясписи. Вместващите и подхранващи находките на яспис скали са вулкански и туфогенни материали, свързани с първия среднокисел вулканизъм.

Горна кула (Gk). Представено е от алувиален тип червени ясписи в долината на река Крумовица преди едноименното село. Най-вероятно, подхранващите проявлението скали са свързани с разкрития на първия среднокисел вулканизъм.

Пазарци (Pa). Представено е от коренен тип, предимно зелен, на места жълтокафяв, яспис (фиг. 5) и алувиални ясписи в дерето при природната забележителност "Пазарските пирамиди" (Костов и др., 2015). Подхранващите находките на яспис скали са вулкански и туфогенни материали, свързани с втория среднокисел вулканизъм.

Звездел (Zv). В отвалите, северно от бившия рудник Звездел, се откриват изключително само червени ясписи, като прожилки и на петна във вместващите скали. Локалитетът е споменат в описа на ясписовите проявления в Източните Родопи (Тодорова и Василева, 2007).

Подхранващите находките на яспис скали са вулкански и туфогенни материали, свързани с първия среднокисел вулканизъм при едноименния рудник.

Минерален състав и рентгенофазова диагностика

Ясписите са предимно нееднороднозърнести, кварц-халцедонови по състав, понякога микросферолитни, а по цвят са едноцветни, двуцветни, многоцветни и пейзажни. При ясписите от изучения регион се наблюдава голямо текстурно разнообразие, като по-често срещаните текстури са ивичеста, флуидална, струевидна, петниста, лещовидна, инкрустационна, брекчевидна, концентрично-зонална, прожилкова и други (Michaylov, 2015). По минерален състав ясписовите образувания се разделят на три основни типа: предимно кварцови; предимно халцедонови (халцедоно-лити); фелдшпатови и кварц-фелдшпатови (ясписоподобни скали). Изучените ясписи се отнасят и трите типа, с доминиране на първия и втория генетичен тип – микрозърнести кварц-съдържащи и халцедон-съдържащи.

Данните от проведените рентгеноструктурни анализи (диагностирани с представени силни линии d, Å) показват общо взето сходен и сравнително еднороден фазов състав, който се потвърждава при наблюдение на дюншлифи от пробите под оптичен микроскоп: при зелените разновидности – кварц със селадонит, при жълтите – кварц с гьотит, а при червените – кварц с хематит (Таблица 1-2; фиг. 6-10).

При някои проби от яспис и сродни образувания се отбелязват още и други минерали, като пирит, разновидности на опала, а при ясписоподобните скали още и К-фелдшпат (санидин), плагиоклаз, амфибол, слюда, монтморилонит и хлорит.

Таблица 1.
Описание на изучените ясписи със съответния минерален състав

Проба/цвят	Минерален състав	Проба/цвят	Минерален състав
Bu1-светлокафяв	Кварц, гьотит	Pi1-червен	Халцедон, хематит
Ta1-червен	Халцедон, хематит	Yu1-зелен	Халцедон, селадонит, кристобалит, тридимит
Li1-светлокафяв	Опал, халцедон, гьотит	Ka6-зелен	Кварц, халцедон, селадонит, опал-С
Sk1-червен/зелен	Халцедон, опал-СТ	Ka7-жълт	Кварц, халцедон, гьотит
Md1-жълт	Халцедон, кварц, гьотит	Ka12-червен	Кварц, халцедон, гьотит
Pc1-тъмночервен	Кварц, хематит	Bo1-жълт	Кварц, халцедон, опал
Pc2-тъмночервен	Кварц, хематит	De1-зелен	Халцедон, селадонит
Pc3-жълт	Халцедон, гьотит	De2-жълт	Кварц, гьотит
Ar1-червен	Кварц, халцедон, хематит	De3-червен	Кварц, халцедон, хематит
Dc1-кафяв	Опал, тридимит	Ne1-зелен	Халцедон, селадонит, опал
Ch1-жълт	Кварц, халцедон, гьотит	Ne2-жълт	Халцедон, гьотит, хематит, опал
Ch2-зелен	Халцедон, селадонит, опал-Т	Ne3-червен	Халцедон, хематит, опал
Ch3а-червен	Халцедон, хематит	Ko1-червен	Халцедон, хематит
Ch3б-зелен	Халцедон, опал-СТ	Mo1-червен	Опал-С, хематит, кварц
Ch4-лилав	Халцедон, хематит	Dj1-тъмночервен	Кварц, хематит, плагиоклаз, К-фелдшпат, монтморилонит
Ch5-червен	Халцедон, хематит, гьотит	Dj2-червенокафяв	Кварц, хематит, плагиоклаз, К-фелдшпат, амфибол
Ch6-кафяв	Опал-Т	Gk1-червен	Кварц, хематит, пирит
Pr1-светлосив	Кварц, халцедон	Pa1-зелен	Кварц, халцедон, селадонит; опал-СТ
Pr2-жълт	Халцедон, гьотит, хематит	Pa2-червен	Кварц, хематит, пирит
Pr3-червен	Кварц, хематит, гьотит	Zv1-червен	Кварц, хематит
Pr4-светлокафяв	Опал, халцедон, кварц	-	-

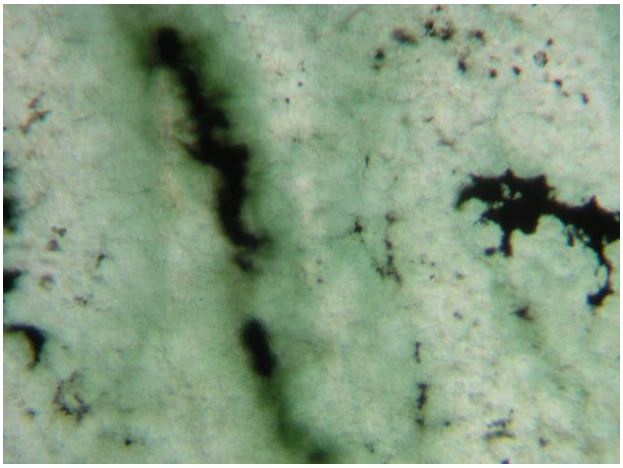
Фиг. 1. Кафяв яспис от проявление Прогрес

Фиг. 2. Зелен яспис от проявление Юнаци

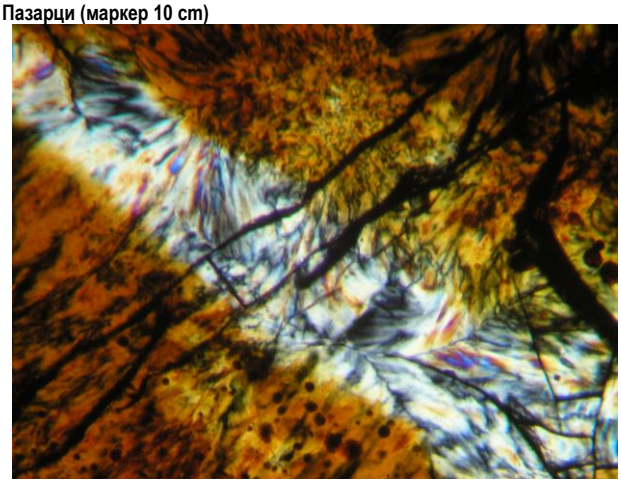
Фиг. 3. Светлокафява яспис-опалова жила при проявление Бойник

Фиг. 4. Тъмнозелен и жълт яспис (30x20x17 cm) с червени петна (хелиотроп) от проявление Неофит Бозвелиево

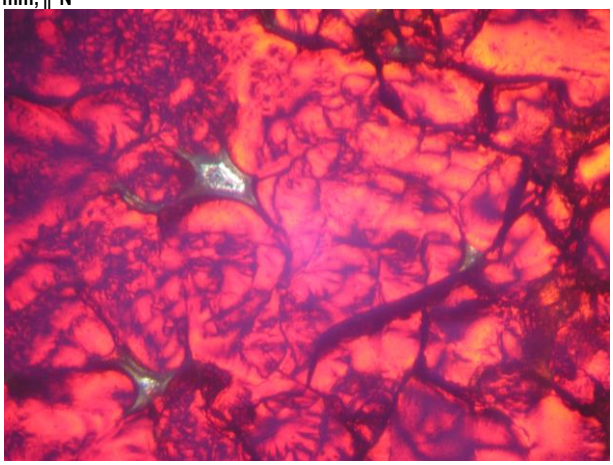
Фиг. 5. Коренно разкритие на предимно зелен яспис от проявление Пазарци (маркер 10 cm)



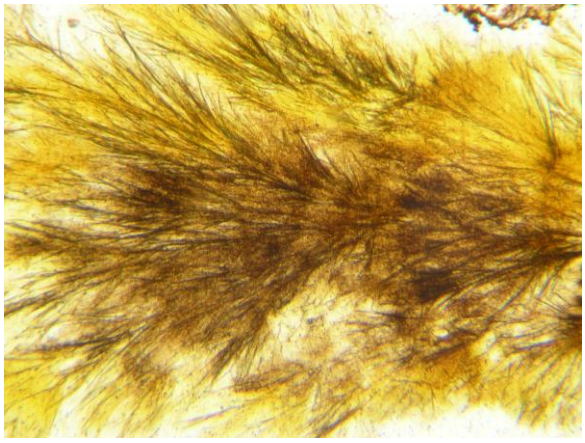
Фиг. 6. Зелен яспис (Ne1): халцедон (бяло) и бледозелен селадонит; FOV 1 mm; ‖ N



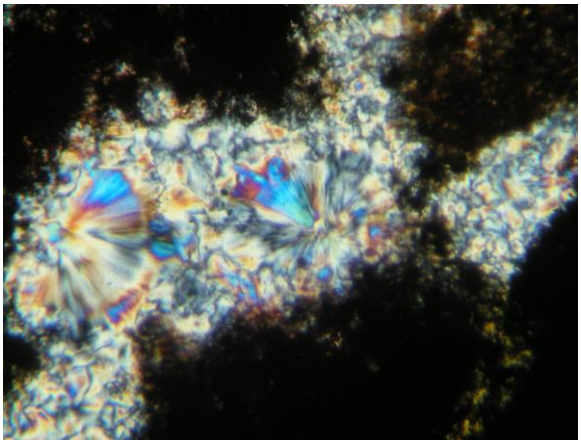
Фиг. 7. Жълт яспис (Ne2) с халцедон и микросфери от гьотит (черно); FOV 1 mm; x N



Фиг. 8. Червен яспис (Pi1) с кварц и прахест хематит; FOV 1 mm; x N



Фиг. 9. Жълт яспис (Ch14) с халцедон и фин влакнест гьотит; FOV 1 mm; ‖ N



Фиг. 10. Жълт яспис (Pc3) с финозърнест и радиалнолъчест халцедон и плътни агрегати от гьотит (черно); FOV 1 mm; x N

Таблица 2.

Диагностика на микрокварц (Q) или халцедон (Ch) в яспис, определен по интензитета на рентгеновите отражения 110, 102 и 111, както и данни за опал със съответни разновидности (O; C – кристобалит; T – тридимит) в пробите

Проба/цвят	I_{110}	I_{102}	I_{111}	I_{110}/I_{102}	$2I_{111}/I_{102}$	I_{102}/I_{111}	SiO_2
Bu1-светлокафяв	100	88.0	28.9	1.14	0.66	3.04	Q
Ta1-червен	95.1	100	39.1	0.95	0.78	2.56	Ch
Li1-светлокафяв	-	-	-	-	-	-	Ch + O
Sk1-червен/зелен	-	-	-	-	-	-	Ch + O-CT
Md1-жълт	78.6	100	37.9	0.79	0.76	2.64	Ch + Q
Pc1-тъмночервен	100	94.3	42.3	1.06	0.90	2.23	Q
Pc2-тъмночервен	100	76.9	27.6	1.30	0.72	2.79	Q/Ch
Pc3-жълт	63.0	100	25.9	0.63	0.52	3.68	Ch
Ar1-червен	96.0	100	39.3	0.96	0.79	2.54	Q>Ch
Dc1-кафяв	-	-	-	-	-	-	O-T + Ch/Q
Ch1-жълт	100	92.4	68.8	1.08	1.49	1.34	Q + Ch
Ch2-зелен	90.1	100	71.4	0.90	1.43	1.40	Ch
Ch3a-червен	92.7	100	60.8	0.93	1.22	1.64	Ch
Ch3б-зелен	86.8	100	44.7	0.87	0.89	2.24	Ch
Ch4-лилав	80.9	100	54.0	0.81	1.08	1.85	Ch
Ch5-червен	91.2	100	69.9	0.91	1.40	1.43	Ch
Ch6-кафяв	-	-	-	-	-	-	O-T + Ch
Pr1-светлосив	100	83.2	43.4	1.20	1.04	1.92	Q
Pr2-жълт	80.0	100	29.6	0.80	0.59	3.38	Ch
Pr3-червен	100	82.8	37.1	1.21	0.90	2.23	Q
Pr4-светлокафяв	100	51.4	16.2	1.95	0.63	3.17	Ch + O-T
Pi1-червен	90.0	100	42.0	0.90	0.84	2.38	Ch
Yu1-зелен	96.3	100	39.0	0.96	0.78	2.56	Ch; CT
Ka6-зелен	100	79.7	70.8	1.25	1.78	1.13	Q>Ch
Ka7-жълт	100	54.7	35.0	1.28	1.28	1.56	Q>Ch
Ka12-червен	100	100	59.3	1.00	1.19	1.68	Q + Ch
Bo1-жълт	81.8	100	21.8	0.82	0.44	4.59	Q + O-T
De1-зелен	46.2	100	22.3	0.85	0.68	2.96	Ch
De2-жълт	93.1	100	36.2	0.93	0.72	2.76	Ch
De3-червен	100	67.4	24.2	1.48	0.72	2.79	Q Ch
Ne1-зелен	67.8	100	34.2	0.68	0.68	2.92	Ch
Ne2-жълт	55.1	100	31.1	0.92	0.77	2.61	Ch
Ne3-червен	62.7	100	41.0	0.63	0.82	2.44	Ch
Ko1-червен	82.7	100	40.3	0.83	0.81	2.48	Ch
Mo1-червен	-	-	-	-	-	-	O-C + Q
Dj1-тъмночервен	100	94.0	38.9	1.06	0.83	2.42	Q
Dj2-червенокафяв	97.6	100	60.3	0.98	1.20	1.66	Q
Gk1-червен	100	93.1	38.5	1.07	0.83	2.42	Q
Pa1-зелен	97.1	100	41.5	0.97	0.83	2.41	Q/Ch + O
Pa2-червен	100	84.0	76.0	1.19	1.81	1.10	Q
Zv1-червен	100	82.6	38.1	1.21	0.92	2.17	Q

Съобразно методиката за определяне на преобладаващата фаза от микрозърнест кварц или халцедон в даден яспис по интензитета и съотношението на рентгеновските отражения 110, 102 и 111, съответно при d=2,45, 2,27 и 2,23 Å (Яковлева и др., 1976; Барсанов и др., 1979), в пробите е определено преобладаването на една или друга разновидност на SiO_2 (Таблица 2).

Направеният анализ, заедно с проверката чрез оптична микроскопия (дюншлифи) на различни проби от яспис, показва, че достоверни за определяне на относителното преобладаване на микрозърнест кварц или халцедон са резултатите от отношението I_{110}/I_{102}, но не и цитираното в посочената литература съотношение $2I_{111}/I_{102}$ или I_{102}/I_{111}. При пробите със значим примес от опал или при наличие на вулканско стъкло, тези съотношения не са приложими (например, проби Pr4 и Bo1).

В изучените проби от яспис, за предимно микрозърнестите кварц-съдържащи разновидности, се установяват две подгрупи по съотношението на интензитета на рентгеновските отражения I_{102}/I_{111}: със стойности в интервала 1,10-2,00, които са характерни за проби от предимно зелен и жълт (светлокафяв) яспис и със стойности в интервала 2,10-3,10, които са характерни предимно за проби от червен яспис.

По отношение на предимно халцедон-съдържащите разновидности, се установяват също две подгрупи по съотношението I_{102}/I_{111}: със стойности в интервала 1,40-2,60, които са характерни предимно за проби от червен яспис и със стойности в интервала 2,60-3,70, които са характерни предимно за проби от зелен и жълт (светлокафяв) яспис.

При халцедоните се отбелязва обратно пропорционална връзка между увеличението на това съотношение и намаляване на индекса на кристалинност ($И_{кр.}$), който е функция на размерността на кварцовите кристалити, а едновременно се изменят и други физични характеристи и структурни параметри, като например увеличение на ОН групите, неподредеността на кварца по данни от инфрачервена спектроскопия и се отбелязва намаляване на относителното тегло и показателят на лъчепречупване (Барсанов и др., 1979; в цитирания източник при халцедоните съотношението I_{102}/I_{111} варира в интервала 1,40-3,68). В конкретния случай, с изучените ясписи от голям брой проявления в Източните Родопи, може да се приеме, че индексът на кристалинност намалява при червените микрозърнести кварц-съдържащи ясписи, а се увеличава при червените халцедон-съдържащи ясписи. Отбелязани са зависимости още и между степента на кристалинност и определени парамагнитни дефекти при халцедона (Плюснина и Костов, 1988).

В Източните Родопи се отбелязват предимно ясписи с червен, тъмночервен, жълт до светлокафяв и зелен до тъмнозелен цвят. По-рядко се срещат кафяви, лилаворозови и сиви разновидности. Освен еднородно оцветени, широко разпространени са двуцветни и многоцветни (включително и т.нар. пейзажни) ясписи с различна текстура. Тяхната структура е нееднородно зърнеста, микросферолитна, а наблюдаваните текстури биват еднородна, нееднородно-ивичеста, струевидна, брекчовидна, прожилкова и петниста. Блестящите (брокатен тип) ясписи се свързват с наличие на опал.

По генетичен белег ясписовите образувания най-общо се приемат за резултат от промяна на изходните материали от вулкански скали, техните туфи и туфобрекчи – продукти на нискотемпературно метасоматично изменение, или съответстващи на втория тип по класификацията на Барсанов и Яковлева (1978). Срещат се и нискотемпературни хидротермални разновидности при някои ахати (яспис-ахат), опали (яспис-опал) и коралити (яспис-коралит).

Заключение

За пръв път са установени и описани, със съответния им минерален състав, 8 коренни проявления на яспис, както и над 20-на алувиални и делувиални проявления на тази гемологична суровина. Регистрирани са и няколко проявления на ясписоподобни материали. По отношение на геоложката позиция и възраст, находките се отнасят към първия, втория и третия стадий (задруги) на среднокиселия вулканизъм в Източните Родопи с горноеоценска и олигоценска възрасти.

Описани са различни по генезис проявления с различни цветови разновидности на ясписа и сродните образувания. По състав и по цвят се отделят три основни групи ясписи: червени - с примес от хематит, жълти - с примес от гьотит и зелени - с примес от селадонит. Въз основа на някои съотношения на интензитетите на рентгеновските отражения се отделят главно две групи образци: съществено микрозърнесто-кварц-съдържащи и съществено халцедон-съдържащи ясписи. Направените изследвания показват перспективността на по-широки площи от Източните Родопи по отношение на разпространението на този ювелирен материал.

Благодарности. Авторите изказван благодарност за предоставена информация за наличие на ясписи в определени части от Източните Родопи на колегите проф. дгн Ангел Кунов, проф. д-р Росен Недялков, доц. д-р Стефанка Иванова, доц. Йоцо Янев, д-р Стоян Георгиев, както и на г-н Петър Запрянов. Благодарност се изказва и на доц. д-р Б. Банушев за съдействие при микроскопските наблюдения и микрофотографии.

Литература

Атанасов, В. А., Й. А. Йорданов. Месторождения яшм в Болгарии. – В: *Морфология и фазовые равновесия минералов. Материалы XIII конгресса ММА, Варна, 19-25 сентября 1982.* С., БАН, 1986. - 379-386.

Барсанов, Г. П., М. Е. Яковлева. *Минералогия яшмы СССР.* М., Наука, 1978. - 88 с.

Барсанов, Г.П., И.И. Плюснина, М.Е. Яковлева. Особенности состава, некоторых физических свойств и структуры халцедона. – *Новые данные о минералах*, *28*, 1979. - 3-33.

Боянов, И., Д. Кожухаров, А. Горанов, Ж. Шиляфова, М. Русева. *Обяснителна записка към геоложка карта на*

България. М 1:100000. Картен лист Искра (ред. Д. Кожухаров, И. Боянов). С., Аверс, 1995. - 87 с.

Георгиев, В. *Металогения на Източните Родопи.* С., Акад. изд. Проф. Марин Дринов, 2012. - 262 с.

Горанов, А. Литология на палеогенските отложения в част от Източните Родопи. – *Тр. Геол. България, Сер. Геох. пол. изкоп., 1*, 1960. - 259-310.

Горанов, А., Д. Кожухаров, И. Боянов, Е. Кожухарова. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100000. Картен лист Крумовград и Сапе (ред. Д. Кожухаров, И. Боянов).* С., Аверс, 1995. - 87 с.

Иванов, Р. Магматизмът в източнородопското палеогенско понижение. 1. Геология. – *Тр. Геол. България, Сер. Геох. пол. изкоп., 1*, 1960. - 311-387.

Илиев, Р. Изследвания върху декоративни халцедони и ясписи от някои находища в Източните Родопи. – *Годишник на Софийския университет "Св. Климент Охридски", ГГФ, 1, Геология, 89*, 1996. - 191-201.

Йорданов, Б., С. Саров В. Вълков, С. Георгиев, И. Калинова, Д. Камбуров, Е. Раева, Е. Воинова, М. Овчарова, Б. Кунчева. *Обяснителна записка към геоложка карта на България. М 1:50000. Картен лист Джебел и Кирково*. С., 2008. - 132 с.

Киевленко, Е. Я., Н. Н. Сенкевич. *Геология месторождений поделочных камней*. 2-е изд., М., Недра, 1983. - 263 с.

Кожухаров, Д., А. Горанов, И. Боянов, Е. Кожухарова, Ж. Шиляфова, М. Русева. *Обяснителна записка към геоложка карта на България. М 1:100000. Картен лист Кърджали (ред. Д. Кожухаров, И. Боянов).* С., Аверс, 1995. - 87 с.

Костов, Р. И. *Скъпоценни минерали: определяне, разпространение, обработка, история и приложение (Гемология).* С.-М., Pensoft, 2003. - X, 453 с.

Костов, Р. И. Преглед на минералогичната систематика на ясписа и сродните скали. – *Геология и минерални ресурси, 13*, 9, 2006. - 8-12.

Костов, Р. И. *Археоминералогия на неолитни и халколитни артефакти от България и тяхното значение в гемологията*. С., Изд. "Св. Иван Рилски", 2007. - 124 с.

Костов, Р. И., Р. Паздеров, Л. Михайлов. Геофеноменът "Скалните пирамиди" при село Пазарци (Източни Родопи). – *Геология и минерални ресурси*, 9, 2015. - 2-6.

Петрусенко, С. И., Р. И. Костов. *Скъпоценните и декоративните минерали на България*. С., БАН, 1992. - 90 с.

Плюснина, И. И., Р. И. Костов, О неупорядоченности халцедона по данным электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). – *Геох., минерал. и петрол.*, *25*, 1988. - 20-27.

Пожаревски, И. М. Проявления на ювелирни разновидности на силициевия двуокис в района на Момчилград. – *Рудообразувателни процеси и минерални находища, 30*, 1989. - 37-45.

Саров, С., Б. Йорданов, С. Георгиев, В. Вълков, Е. Балканска, В. Гроздев, Р. Маринова, Н. Марков, К. Колчева, Б. Банушев, Д. Синьовски. *Обяснителна записка към геоложката карта на Република България Мащаб 1:50000. Картен лист К-35-88-В (Крумовград) и К-35-100-А (Егрек)* (ред. Йорданов, Б., С. Саров). С., 2008. - 124 с.

Тодорова, С., С. Василева. *Богатството на един южен край*. С., Гутенберг, 2007. - 135 с.

Яковлева, М. Е., О. Л. Свешникова, Т. С. Бут. О рентгеновской диагностике кварца и халцедона. – В: *Новые даннье о минералах СССР. Вып. 25*, М., Наука, 1976. - 234-237.

Campos-Venuti, M. *Genesis and Classification of Agates and Jaspers: a New Theory.* Tip. Luciani, Rome, 2012. - 160 p.

Kostov, R. I. Review on the mineralogical systematics of jasper and related rocks. – *Arheometriai Műhely*, *Archaeometry Workshop, 7,* 3*,* 2010. - 209-213.

Michaylov, L. Textures and colour of jaspers from the Eastern Rhodopes. – *VIII International Symposium "Mineral Diversity Research and Preservation". Abstracts. 'Earth and Man' National Museum, 9-12 October 2015*, *Sofia,* 2015. - 31.

Статията е рецензирана от доц. д-р Ст. Стойков и е препоръчана за публикуване от кат. "Минералогия и петрография".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ХИМИКО-МИНЕРАЛОЖКА ХАРАКТЕРИСТКА НА ДРЕВНИ ШЛАКИ ОТ РОСЕНСКОТО РУДНО ПОЛЕ
ЧАСТ 1 – НАХОДИЩЕ "ПРОПАДНАЛА ВОДА"

Добринка Ставракева[1], Николета Цанкова[2]

[1] Химикотехнологичен и металургичен университет, 1756 София
[2] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, niktzankova@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Обект на настоящото изследване са древни шлаки от околностите на нах. "Пропаднала вода", Росенско рудно поле. С методите на оптическата микроскопия в проходяща и отразена светлина, прахова рентгенова дифрактометрия, химичен анализ с ICP-OES, CEM и рентгеноспектрални микроанализи е установено, че шлаките са изградени основно от желязо-силикатни и желязо-оксидни фази. Изучаваните образци са с високо съдържание на желязо, наличие на мед, сяра, сяросъдържаши сулфидни агрегати (щейнови), примеси от фосфор, церий и лантан. Във всички проби макроскопски и микроскопски се наблюдават сферични капки от самостоятелна мед. Изследваните шлаки са доказателство за древен металодобив в района около нах. "Пропаднала вода" и представляват отпаден продукт от медодобивна дейност, при която е преработвана медно-сулфидна руда.

Ключови думи: археометалургия, древни шлаки, мед, медно-сулфидни (щейнови) агрегати, медно-оксидни, желязо-силикатни и желязо-оксидни фази

CHEMICO-MINERALOGICAL CHARACTERISATION OF ANCIENT SLAGS FROM ROSEN ORE FIELD
PART 1 – PROPADNALA VODA DEPOSIT

Dobrinka Stavrakeva[1], Nikoleta Tzankova[2]
[1] University of chemical technology and metallurgy, 1756 Sofia
[2] University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, niktzankova@abv.bg

ABSTRACT. The objects of this study are ancient slags from the vicinity of Propadnala voda deposit, Rosen ore field. With the methods of optical microscopy in transmitted and reflected light, X-ray powder diffraction, chemical analyses by ICP-OES, CEM and X-ray microanalyses, is was found that the slags consist mainly of iron-siliceous and iron-oxide phases. The analyzed samples are with high iron content, the presence of copper, sulphur, sulfide aggregates, impurities of phosphorous, cerium and lanthanum. Macroscopically and microscopically spherical drops of copper are observed in all studied samples. The analyzed slags are evidence of ancient metal production in the area around Propadnala voda deposit and represent a by-product product of copper mining activity in which the copper sulfide ore was processed.

Key words: archaeometallurgy, ancient slags, copper, copper-sulfide aggregates, copper-oxide phases, iron-siliceous and iron-oxide phases

Въведение

Подземните природни богатства от Росенското рудно поле са били известни на хората от дълбока древност (Черных, 1978; Георгиев, 1987; Димитров, 2007; Лещаков, 2010 и др.). Обект на настоящето изследване е металургична шлака, открита по протежение на повърхностна древна минна изработка (рупа) с дължина над 200 m и с изток-североизточна посока (70^0) в района на нах. "Пропаднала вода". Керамични фрагменти, намерени по отвалите на рудника, са отнесени към VI-V в. пр. н. е. (Leshtakov, 2013).

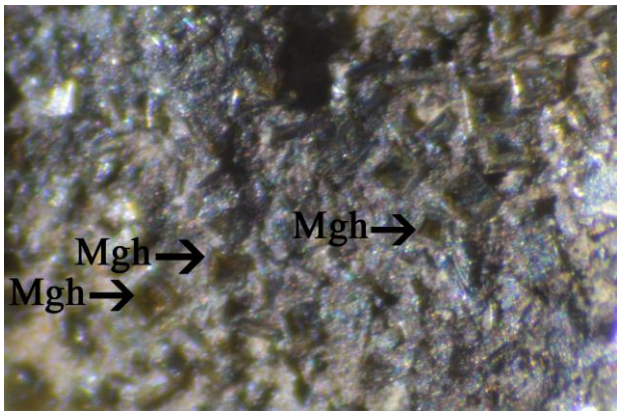
Находище "Пропаднала вода" с голямо промишлено значение е експлоатирано до средата на $90^{-те}$ години на 20 век. Минералните парагенези и стадии на минерализация в находищата от Росенското рудно поле са проучени и отразени в работите на Тонев (1952, 1959), Богданов и др. (1968а, 1968б), Антонова (1989) и др. Главни рудни минерали в тях са халкопирит, пирит, магнетит, хематит (спекуларит) и молибденит, а от жилните – кварц, анкерит, феродоломит, калцит, хлорит и халцедон (Богданов, 1987).

Целта на работата е химико-минераложко изследване на древни шлаки от района на нах. "Пропаднала вода" за установяване на вида на преработваната руда и на добивания метал.

Материал и методи на изследване

Изследвани са проби от четири точки (проба 2, 4, 5 и 6), по протежение на древния рудник (рупа) в района на нах. "Пропаднала вода". Проба 2 е от североизточната част на рупата. Шлаката е тъмносива, прилепва към магнит, слабо пореста. По повърхността й се наблюдават субквадратни

кристали от магхемит със стъклен блясък и кафяв цвят (фиг. 1). В някои от образците визуално се установяват метални капки с оранжевочервен цвят. Шлаката от проба 4, намерена около 60 м югозападно от проба 2 по протежение на рупата, е магнитна. Тя бива два вида: светлосива до бежова на цвят, порьозна в целия си обем и тъмносива, плътна, съдържаща капки с цвят на мед. Шлаката от проба 5, от югозападната част на рупата, е тъмносива, прилепва към магнит. Макроскопски в нея се наблюдават множество метални капки с оранжевочервен цвят. Проба 6 е от север-североизточната част на рупата, в близост до останки от металургична пещ. Тези образци са най-тъмни (почти черни) в сравнение с останалите шлаки от района на нах. "Пропаднала вода". По повърхността на изследваните материали от всички проби се наблюдават вторични минерали – железни оксиди и хидрооксиди, хризокола и др.



Фиг. 1. Шлака с кристали магхемит (Mgh) от проба 2, размер на видното поле 2 mm

Шлаките са изучени фазово-структурно с методите на оптическата микроскопия в проходяща и отразена светлина с микроскопи Meiji MT9200 и MT9430 с камера DK1000. Фазовият минерален състав е определен с прахова рентгенова дифрактометрия на дифрактометър Bruker Phaser с рентгеново лъчение Cu/Ni в интервал 2Theta 4^0-70^0 и 30 kV/10 mA, 0,2/0,5 s, като за сравнение е използвана PDF-картотеката на ICDD. За определяне на химичния състав на кристалните фази и вместващата шлакова фаза са проведени рентгеноспектрални микроанализи (РСМА) на апарат JEOL LSM-6010PLUS/LA, оборудван с енергийно-дисперсионен микроанализатор с резолюция от 128 eV. Химичният състав на шлаките е определен с ICP-OES след високотемпературно алкално стапяне.

Въз основа на химичния състав на кристалните фази в точка са изчислени кристалохимичните им формули по кислородния метод. Използваните данни са в масови атомни проценти на установените елементи, а количеството на кислорода е определено като разлика до 100 %. Този подход е възприет поради това, че желязото и медта е възможно да присъстват с различна степен на окисление (валентност), чиито количества по класическия силикатен анализ се определят по-неточно. Освен това определянето на масовите проценти на съответните оксиди по точковия анализ с РСМА също дава невярна информация, ако желязото се зададе в Fe^{2+} или Fe^{3+}, тъй като се променят съдържанията на другите оксиди. Приложеният вариант на кислородния метод за изчисляване на кристалохимичните формули по данни от РСМА позволява чрез проверка на електростатичния баланс на катионната и анионната части във формулите за съответните кристални фази (минерали) да се определи относителният дял на Fe^{2+} и Fe^{3+} или на Cu^{+} и Cu^{2+}.

Химичен състав на шлаките

От данните за химичния състав на изследваните шлаки, приведени в таблица 1, се констатира, че те се характеризират с повишени съдържания на железни оксиди и SiO_2 и в по-малки количества на останалите оксиди.

Таблица 1.
Химичен състав на шлаки от района на нах." Пропаднала вода" по данни от ICP-OES анализи

Оксиди, wt %	Проба 2	Проба 4	Проба 6
SiO_2	36,58	31,49	34,25
TiO_2	0,27	0,30	0,27
Al_2O_3	6,39	8,51	5,50
Fe_2O_3	46,41	49,28	53,00
CaO	1,42	2,38	1,31
MgO	0,45	0,35	0,28
MnO	0,05	0,03	0,04
K_2O	1,31	1,17	0,88
Na_2O	0,20	0,22	0,14
P_2O_5	1,08	2,46	1,24
SO_3	0,60	0,53	0,78
Cu	4,37	2,49	0,88
З.Н.	1,06	0,82	0,47
Сума	100,19	100,03	99,04
Коеф. за основност	1,05	1,30	1,37

Като се изходи от химичните състави на изследваните шлаки може да се констатира, че те се отличават с основност. Коефициентите за основност на анализираните проби са показани в таблица 1.

В шлаките от нах. "Пропаднала вода" е определено участие на самостоятелна мед, чието количество е забележимо в проби 2 и 4. Важно е да се отбележи, че в анализираните проби е определено присъствие на SO_3 и P_2O_5. Съдържанието на P_2O_5 варира в границите 1,08 – 2,46 % (табл. 1).

За химичния състав на шлаките може да се получи информация и от резултатите от точковите микросондови анализи на вместващата стъкловидната шлакова маса, които са приведени в таблица 2. Химичният състав в анализи 4.2.005 и 6.1.003 от проби 4 и 6 е близък (таблица 2). Тези проби се характеризират със съдържание на Si около 10-11% и на желязо около 45-48%. Анализираните индивиди си приличат, но не отговарят на определена стехиометрия, поради което се приемат за шлаково стъкло, обогатено с фаялитов състав. Шлаковото стъкло е желязосиликатно. Съставът в точка 6.2.001 може също да се приеме за стъклофаза, обогатена на фаялитова молекула.

Таблица 2.

Химичен състав на шлаковото стъкло в древни шлаки от района на нах. "Пропаднала вода" по данни от РСМА

Проба, анализ	Елемент, %													
	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	K	Na	Cu	S	P	La	Ce	O
Пр. 2, ан.2.1.002	17,818	–	2,054	41,189	0,423	0,595	0,876	0,169	0,263	0,004	0,414	0,184	0,097	35,915
Пр. 2, ан.2.1.003	21,917	0,022	6,191	21,477	0,073	0,595	4,477	0,193	0,178	0,062	0,701	0,358	0,385	44,717
Пр. 2, ан.2.2.001	22,375	0,032	6,962	16,707	0,072	2,932	1,516	0,354	0,356	0,083	0,774	0,344	0,783	46,709
Пр. 2, ан.2.2.002	20,175	0,057	3,938	32,334	0,028	0,447	1,955	0,292	0,147	0,047	0,057	0,076	–	40,445
Пр. 4, ан.4.2.005	10,486	0,004	0,173	45,015	0,310	0,052	–	–	0,117	–	0,497	0,054	–	43,292
Пр. 4, ан.4.2.006	16,513	–	6,259	17,090	0,030	2,951	1,403	0,160	0,239	0,006	1,372	0,101	0,355	53,510
Пр. 5, ан.5.1.002	14,718	0,005	3,789	33,835	0,219	1,051	0,171	0,061	0,265	0,004	1,986	0,075	0,033	43,787
Пр. 5, ан.5.1.003	17,074	0,045	3,488	17,074	0,029	0,149	1,387	0,020	0,118	0,007	0,083	0,038	0,235	47,372
Пр. 6, ан.6.1.003	11,636	–	0,083	47,865	0,246	0,042	0,010	–	0,088	–	0,019	0,160	–	39,850
Пр. 6, ан.6.1.004	21,233	0,034	7,272	15,776	–	2,499	1,845	0,277	0,178	0,030	1,005	0,325	0,643	67,873
Пр. 6, ан.6.2.001	11,442	–	0,319	33,831	0,164	0,097	0,164	0,033	–	0,001	0,117	0,056	–	53,777

Фазово-минераложки състав на шлаките

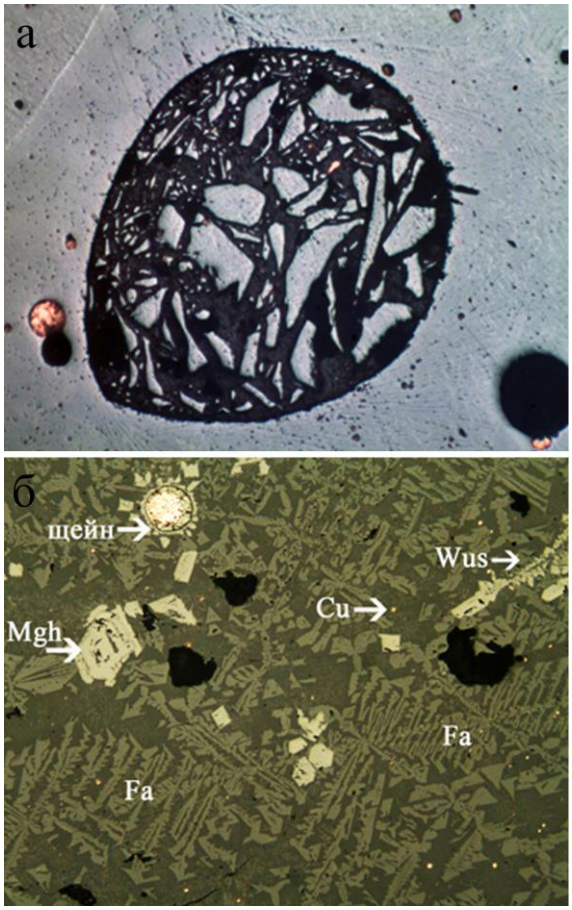
Микроскопско изследване

Шлаката от проба 2 е богата на медни и на ликвационни капки с нехомогенен състав (фиг. 2а). Сред шлаковото стъкло са разпръснати субмикроскопични кристали от фаялит и магхемит (фиг. 4).

Изследваните образци от проба 4 са с по-едра микрозърнеста структура в сравнение с шлаката от проба 2, което свидетелства за по-бавното й охлаждане и кристализация. Наблюдават се: скелетни кристали на фаялит в тъмносив цвят (фиг. 2б, 3а); вюстит под формата на светлосиви кристали, подредени като броеница (фиг. 2б, 3а); изометрични сечения на скелетен модел на магхемит със светлосив цвят (фиг. 2б), доказан и рентгенографски (фиг. 5). Сулфидните агрегати (щейнови) са два цвята – светложълт и оранжев. Около някои от тях се наблюдава ореол от халкопирит (фиг. 2б). По своя минерален състав шлаката представлява типичен пример за краен продукт от добив на мед.

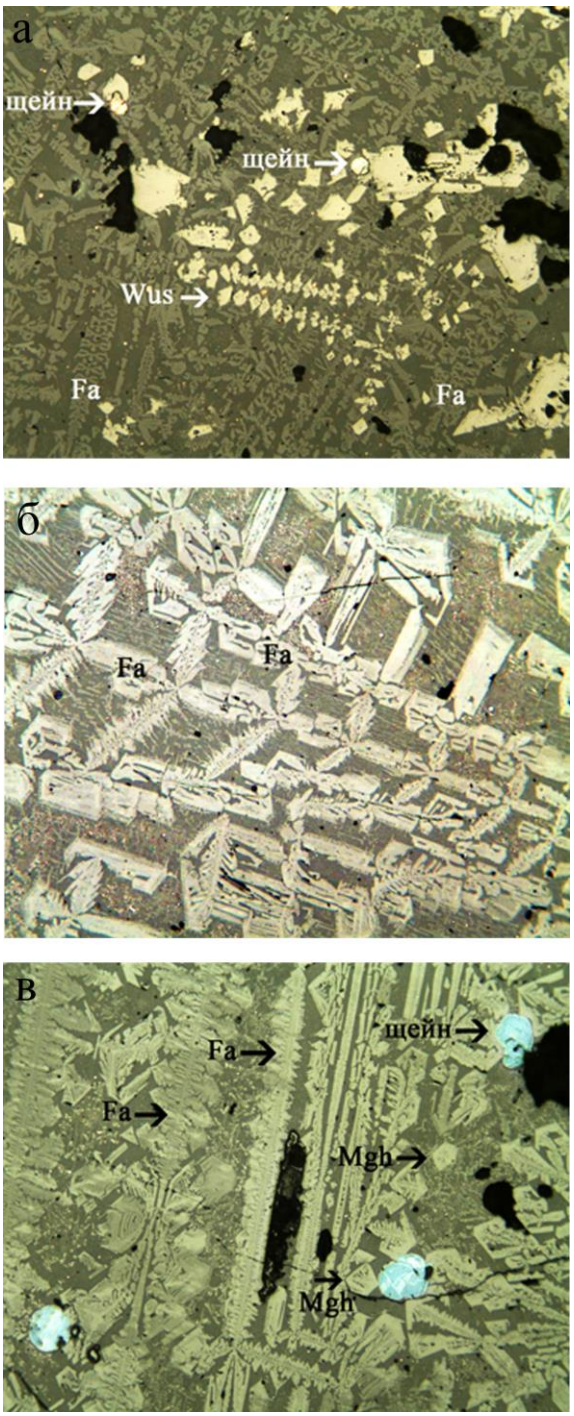
Микроструктурно шлаката от проба 5 е аналогична на проба 2. Наблюдават се финозърнести кристали от фаялит, който се отличава със средни, пъстри цветове на интерференция. Шлаката съдържа голямо количество агрегати с жълто-червеникав цвят, представляващи смес от сулфиди, означавани като щейнови.

В образците от проба 6 се наблюдава типична структура на бавно охладена шлака (фиг. 3б, 3в) с различни прерези на едри кристали от фаялит и магхемит – изометрични скелетни кристали (фиг. 3б, 3в). Изброените минерали са доказани и рентгенографски (фиг. 6). Сулфидните агрегати са нехомогенни, с неправилна форма и по-висока отражателна способност. По-светлата фаза е халкопирит.



Фиг. 2. Микроскопско изследване в отразена светлина на шлаки от района на нах. "Пропаднала вода": а) ликвационна капка в проба 2, размер на видното поле 2125 μм; б) сулфиден агрегат (щейн) с ореол от дребни кристали от халкопирит, медни капки (Cu), вюстит (Wus), скелетни форми на фаялит (Fa) и магхемит (Mgh) в шлака от проба 4, размер на видната поле 850 μм

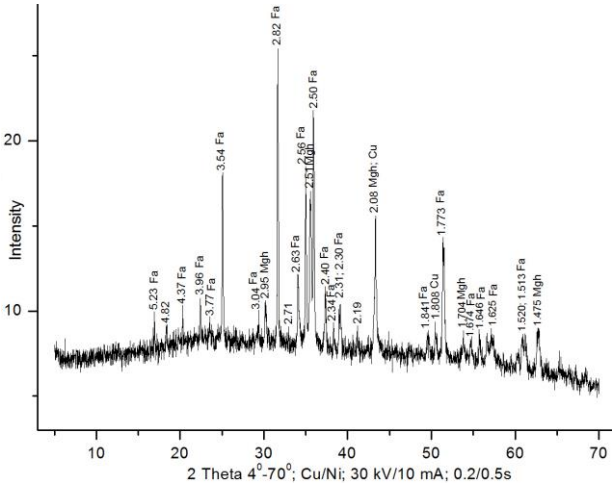
Медните капки са субмикроскопични, сравнително равномерно разпределени в шлаковото стъкло. Тук те са в много по-малко количество в сравнение с другите изследвани шлаки от находище “Пропаднала вода”.



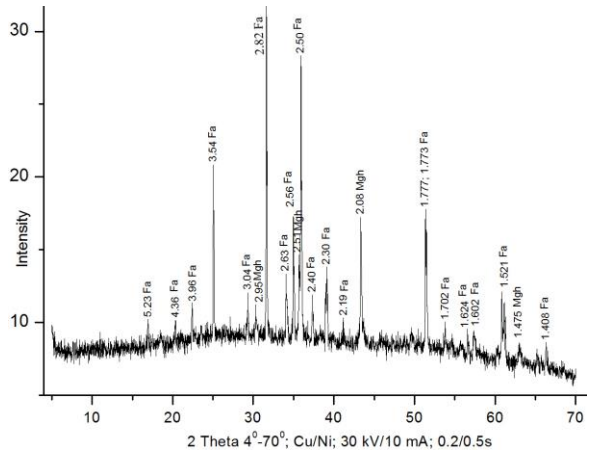
Фиг. 3. Микроскопско изследване в отразена светлина на шлаки от района на нах. “Пропаднала вода”: а) сулфидни агрегати (щейнове) с жълт и оранжев цвят, вюстит (Wus) и фаялит (Fa) в шлака от проба 4, размер на видното поле 850 μм; б) структура на бавноохладена шлака от проба 6 с едри кристали от фаялит (Fa), размер на видното поле 850 μм; в) фаялит (Fa), изометрични скелетни кристали от магхемит (Mgh) и щейнови капки в шлака от проба 6, размер на видното поле 850 μм.

Рентгенофазово изследване на шлаките

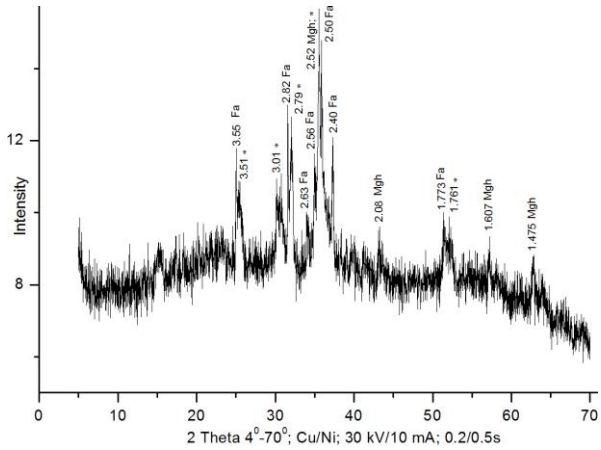
Минералният състав на изследваните шлакови образци по данни от рентгенофазовия анализ е показан на фигури 4, 5 и 6.



Фиг. 4. Прахова дифрактограма на шлака от района на нах. “Пропаднала вода” – проба 2: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; магхемит γ-Fe_2O_3 (Mgh) PCPDFWIN 39-1346; мед Cu PCPDFWIN 04-0836



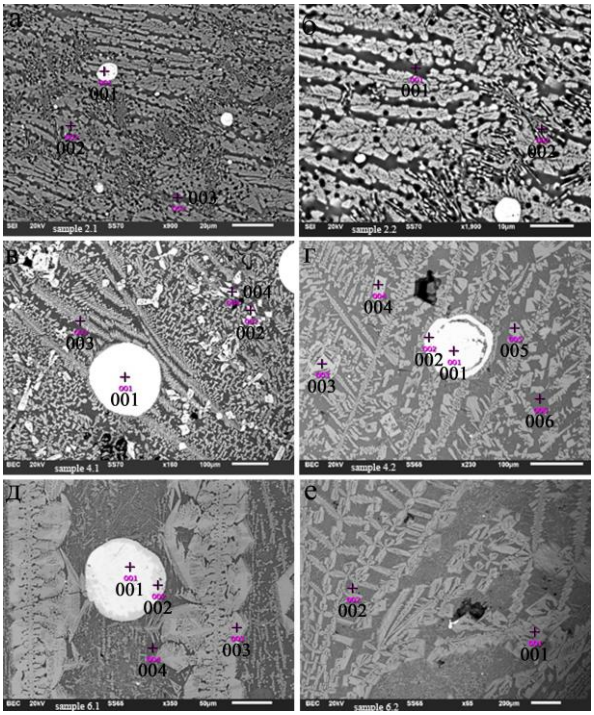
Фиг. 5. Прахова дифрактограма на шлака от района на нах. “Пропаднала вода” – проба 4: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; магхемит γ-Fe_2O_3 (Mgh) PCPDFWIN 39-1346



Фиг. 6. Прахова дифрактограма на шлака от района на нах. “Пропаднала вода” – проба 6: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; магхемит γ-Fe_2O_3 (Mgh) PCPDFWIN 39-1346; * – вероятна желязосиликатна фаза със състав $Fe_{1.6}SiO_4$ (лайхунит-1M) PCPDFWIN 30-0664

Минерален състав на шлаките по РСМА данни

Снимки от изследването със СЕМ на фазите в шлаките и локализация на проведените точкови микросондови анализи са представени на фигура 7.



Фиг. 7. Микроскопски снимки (СЕМ) на изследваните минерални фази от района на нах. "Пропаднала вода": а) проба 2, анализи 2.1.001 – медна капка, 2.1.002 – шлаково стъкло, богато на $FeSiO_3$, 2.1.003 – шлаково стъкло, x900; б) проба 2, анализи 2.2.001 – шлаково стъкло и 2.2.002 – шлаково стъкло с микролити, x1900; в) проба 4, анализи 4.1.001 – медна капка, 4.1.002 – желязо-оксидна фаза, 4.1.003 – фаялит и 4.1.004 – магхемит, x160; г) проба 4, анализи 4.2.001 – купро-куприоксид, 4.2.002 – щейнова капка, 4.2.003 – магхемит, 4.2.004 – магхемит, 4.2.005 – желязосиликатно стъкло (?) и 4.2.006 - шлаково стъкло, x230; д) проба 6, анализи 6.1.001 – щейнова капка, 6.1.002 – ореол на щейнова капка, 6.1.003 – фаялит в шлаково стъкло, 6.1.004 – шлаково стъкло, x350; е) проба 6, анализи 6.2.001 – шлаково стъкло, 6.2.002 – фаялит, x65.

Във всички изследвани шлакови образци са установени желязо-силикатни, желязо-оксидни и медно-оксидни фази, както и сулфидни (щейнови) агрегати и капки от самостоятелна мед във вместващото шлаково стъкло.

1. Желязо-силикатни фази

Желязо-силикатната фаза е представена основно от фаялит, а в някои от образците от лайхунит-1М (фиг. 6). Тези фази са установени рентгенодифракционно и оптично микроскопски в преминаваща светлина. Те са представени от скелетни удължени призматични прерези с характерни пъстри интерференционни цветове от втори порядък.

Кристалохимичните формули на фаялитната фаза в проби 4 и 6 са изчислени по данни от точковия микросондов анализ (табл. 3) и са приведени по долу:

Проба 4, анализ 4.1.003 –

$(Fe^{2+}_{1,73}\, Mg_{0,03}\, Ca_{0,02}\, Na_{0,01}\, K_{0,01}\, Al_{0,08}\, La_{0,04})_{1,92}\, (Si_{0,95}\, P_{0,04})_{0,99}\, O_{4,00}$

Проба 6, анализ 6.2.002 –

$[(Fe^{2+}\, Fe^{2+})_{1,65}\, Mg_{0,02}\, Na_{0,01}\, Al_{0,01}\, Ca, La, Ce]_{1,69}\, (Si_{0,95}\, P_{0,01})_{0,96}\, O_{4,00}$

Таблица 3.

Химичен състав на желязо-силикатни (фаялит) и желязо-оксидни фази (магхемит) по данни от РСМА

Елементи, %	Желязо-силикатна фаза (фаялит)		Желязо-оксидна фаза (магхемит)			
	Пр.4, ан. 4.1.003	Пр.6, ан. 6.2.002	Пр.4, ан. 4.1.002	Пр.4, ан. 4.1.004	Пр.4, ан. 4.2.003	Пр.4, ан. 4.2.004
Si	13,842	14,031	5,515	0,959	0,442	1,073
Ti	0,001	–	0,170	0,192	0,165	0,183
Al	1,100	0,110	6,015	5,180	4,326	4,826
Fe	49,746	50,409	53,061	61,304	58,897	55,550
Ca	0,434	0,047	0,445	–	0,023	0,005
Mg	0,322	0,273	0,072	0,062	0,072	0,141
Na	0,125	0,092	0,166	0,165	0,051	0,050
K	0,288	–	0,396	–	–	0,005
S	–	–	0,005	0,008	0,013	0,008
P	0,616	0,106	0,167	–	–	–
La	0,302	0,088	0,262	0,134	0,034	0,136
Ce	–	0,031	0,273	–	0,146	–
Cu	0,174	–	–	–	–	–
O	33,049	34,812	33,452	31,997	35,832	38,023

Кристалите фаялит най-често не са напълно изградени и представляват скелетно-дендритни форми, което се дължи на сравнително бързото охлаждане и кристализация на шлаките. Поради това при точковия микросондов анализ често се захваща и от вместващата стъкловидна фаза, в резултат на което получените химични анализи не винаги съответстват на точни стехиометрични състави. Освен това в състава на кристалните фази, като изоморфни примеси се включват много от елементите-примеси, участващи в състава на шлаката. Ето защо кристалните фази могат да се приемат структурно като дефектни.

2. Желязо-оксидни фази

Желязо-оксидните фази се представена от вюстит, установен оптично микроскопски и от магхемит, доказан рентгенофазово (табл. 3, фиг. 4, 5 и 6). Химичният състав в точка 4.1.004 е най-близък до стехиометрията на Fe_2O_3, който рентгенографски се определя като магхемит със следната кристалохимична формула:

$(Fe_{1,65}\, Al_{0,29}\, Si_{0,05} Ti_{0,01}\, La, S)_{2,00}\, O_{3,00}$

С аналогична кристалохимична формула като магхемит γ-Fe_2O_3 се представя съставът в точка 4.2.003:

$(Fe_{1,65}\, Al_{0.29} Si_{0.05} Ti_{0.01} Ca, Mg, Na, S, La, Ce)_{2,00}\, O_{3,00}$

3. Медно-оксидни фази

В резултат на непълното протичане на окислително-редукционните процеси при термичната обработка на обработвана медна суровина са се образували медно-оксидни фази с участие на мед в различна степен на окисление (табл. 4). Анализ 4.2.001 е на нехомогенна медна капка от купро- и куприоксиди със захванато шлаково стъкло. Съставът на този оксид може да се представи като смес от куприт и тенорит:

$Cu^{+}_{0,84} Cu^{2+}_{0,58} O$ или $Cu^{+}_{0,84} O_{0,42} Cu^{2+}_{0,58} O_{0,58}$

Анализ 5.1.001 е на фаза, представляваща смес от меден оксид от купро- и куприоксиди. Съставът може да се представи със следната стехиометрия:

$Cu^{+}_{1,62} Cu^{2+}_{0,19} O$ или $Cu^{+}_{1,62} O_{0,81} Cu^{2+}_{0,19} O_{0,19}$

Таблица 4.
Химичен състав на медно-оксидни фази в шлаки от нах. "Пропаднала вода" по данни от РСМА

Проба, анализ	Елемент, %									
	Si	Ti	Al	Fe	K	Cu	S	La	Ce	O
Пр.4,ан. 4.2.001	0,176	–	0,093	0,174	–	84,452	0,038	0,017	0,120	14,931
Пр.5,ан. 5.1.001	0,255	0,006	0,076	0,909	0,010	86,679	0,004	–	–	12,061

4. Щейнови агрегати

В шлаките в отразена светлина се разкриват нехомогенни микроскопични агрегати (фиг.2, 3 и 7), съдържащи медни, железо-оксидни и сулфидни фази. Тези агрегати са резултат от непълното превръщане на сулфидните минерали при термичната обработка на рудата и се означават с металургичната терминология като щейнови агрегати. Химичният състав на няколко такива агрегати са представени в таблица 5.

Таблица 5.
Химичен състав на щейнови агрегати по данни от РСМА

Проба, анализ	Елемент, %						
	Si	Al	Fe	Cu	S	Ce	O
Пр.4,ан.4.2.002	0,119	0,038	0,771	69,728	3,090	0,031	26,224
Пр.6,ан.6.1.001	0,138	0,093	0,511	74,438	3,570	–	21,250
Пр.6,ан.6.1.002	0,207	0,069	1,295	68,369	3,603	0,220	26,160

5. Свободна мед

В шлаките се регистрира визуално и химически наличие на свободна мед в количество от 0,88 до 4,37 mass % (табл. 1). Химичният състав на капки свободна мед по данни от микросондовия анализ е приведен в таблица 6.

Таблица 6.
Химичен състав на медни капки по данни от РСМА.

Проба, анализ	Елемент %							
	Si	Al	Fe	Ca	Cu	S	P	O
Пр.2,ан.2.1.001	0,420	0,145	4,067	0,050	92,887	–	–	2,331
Пр.4,ан.4.1.001	0,274	0,687	0,088	–	97,007	0,015	0,004	1,595

Заключение

Анализираните шлаки са доказателство за съществувал древен металодобив в изследвания район около нах. "Пропаднала вода". За вида на добивания метал може да се съди по наличието на макро- и микроскопични сферични капки на свободна мед.

За вида на добиваната и преработваната медсъдържаща суровина (руда) свидетелстват няколко факта, които категорично доказват, че е добивана медно-сулфидна руда с основни мед- и железосъдържащи минерали като халкопирит и борнит. Във всички образци се открива съдържание на сяра и сяросъдържащи сулфидни агрегати, означавани като щейнови. Те се получават при непълното довеждане на окислително-редукционните процеси на сулфидните минерали при термичното металургично преработване на рудата. В изследваните шлаки се определя високо съдържание на желязо, което е получено при термичната обработка на медно-железни сулфиди. С резултатите от настоящите изследвания се опровергава твърдението, че древният медодобив в района е главно от малахит и азурит (Георгиев, 1987). Минералният състав на изследваните шлаки е представен от железосъдържащи фази като фаялит и магхемит, които са типично характерни фази за съвременните шлаки на медодобивната металургия (Ставракева, Стоицева, 1966; Иванов и др., 1967; Михайлова, 2009).

Благодарности. Изследванията са проведени по проект ДФНИ К02/6 от 12 декември 2014. Авторите на настоящото изследване изказват благодарност на всички членове на колектива на проекта, съдействали за намиране и локализиране на древни металургични шлаки.

Литература

Антонова, Д. Генетични особености на ранната минерална асоциация в Росенското рудно поле. – *Сп. Бълг. геол. д-во, год. L, кн. 1*, 1989. - 66-74.

Богданов, Б. *Медните находища в България*. – С.,Техника, 1987.- 388 с.

Богданов, Б., Р. Рашков, Т. Тодоров. Етапи и стадии на минерализация в медно-молибденовите месторождения от Росенското рудно поле. – В: *Юбилеен геологически сборник на Геол. инст*., С., БАН, 1968а.- 291-308.

Богданов, Б., Р. Рашков, Г. Ярмов, Л. Раев. Гипогенная зональность медно-молибденовых месторождений Росенского рудного поля. – In: 23 Intern. Geol. Congr., Prague, vol. 5, No 7, 1968б.- 281-289.

Георгиев, Г. К. *Полезните изкопаеми от времето на траките*. – С., Изд. БАН, 1987.-108-109.

Димитров, К. *Медната металургия по Западния бряг на Черно море /средата на V – началото на IV хил. пр. Хр.* – Автореф. на дис., С., 2007.- 70 с.

Иванов, И., П. Бакарджиев, И. Грозданов. Фазов състав и структура на отпадъчните медни шлаки от МДК "Г. Дамянов" – гр. Пирдоп – *Рудодобив и металургия,* 1967. - 9.

Лещаков, П. Археометалургични свидетелства за експлоатацията на медните находища от Медни рид през V хил. пр. Хр. В: Геонауки 2010. София, 2010. - 175-176.

Михайлова, И. Изследване на фазовия състав и структурата на пещни металургични шлаки от производството на мед. – *Год. На МГУ "Св. Ив. Рилски",* т. 52, 2009. -73-78.

Ставракева, Д., Р. Стоицева. Химико-петрографска характеристика на отвалните шлаки от ДММП "Г. Димитров" – гр. Елисейна – *Рудодобив и металургия, кн. 2,* 1966.

Тонев, И. Източници на рудообразуване и фактори, благоприятстващи локализацията на рудните разтвори в Бургаския район. – *Минно дело*, 10, 1952. - 605-609.

Тонев, И. Върху минерализацията и генезиса на Бургаските рудни жили. – *Год. На ГУГОЗН*, отд. А, X, 1959. - 195-216.

Черных, Е. Н. *Горное дело и металлургия в древнейшей Болгарии*. С., БАН, 1978. - 387 с.

P. Leshtakov. Early copper metallurgy on the West Black Sea coast: archaeological evidence on Prehistoric exploitation of the Rosen ore field. – *International conference „Where are the sites? Research, Protection and Management of Cultural Heritage, Ahthopol*, 213. - 35-55.

Статията е рецензирана от доц. д-р Ирена Михайлова и е препоръчана за публикуване от кат. "Минералогия и петрография".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ХИМИКО-МИНЕРАЛОЖКА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДРЕВНИ ШЛАКИ ОТ РОСЕНСКОТО РУДНО ПОЛЕ
ЧАСТ 2 – НАХОДИЩА "КОРУЧЕШМЕ" И "РОСЕН", МЕТАЛУРГИЧЕН ЦЕНТЪР "АТИЯ"

Николета Цанкова[1], Добринка Ставракева[2], Петър Лещаков[3], Калин Димитров[3]

[1] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, niktzankova@abv.bg
[2] Химикотехнологичен и металургичен университет, 1756 София
[3] Национален археологически институт с музей – БАН, 1000 София, junior_1_bg@yahoo.com, kalin.d@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Изследвани са древни шлаки, открити в Росенското рудно поле. Те са събрани от повърхността на няколко древни металодобивни центрове, разположени в близост до древните рудници в Медни рид. Добивът на мед там е осъществяван през периода VI в. пр. Хр. - IV-V в. сл. Хр. Химичният състав на образците е определен по данни от ICP-OES. Те са с високо съдържание на Fe_2O_3 и SiO_2. Минералният състав на шлаките е изучен оптично-микроскопски в отразена и преминаваща светлина, рентгенофазово и с рентгено-спектрални микроанализи. В изследваните шлаки се установяват основно желязосъдържащи фази като фаялит, магнетит, магхемит, вюстит, железен монтичелит (кирщайнит), наличие на медно-сулфидни агрегати (щейнови) и капки от самостоятелна мед. Изследваните материали са определени като отпаден продукт от термична обработка на медно-желязо-сулфидна руда за добив на мед в древността.

Ключови думи: археометалургия, древни шлаки, мед, медно-сулфидни агрегати, медно-оксидни фази, желязо-силикатни и желязо-оксидни фази

CHEMICO-MINERALOGICAL CHARACTERISATION OF ANCIENT SLAGS FROM ROSEN ORE FIELD
PART 2 – KORUCHESHME AND ROSEN DEPOSITS, METALLURGICAL CENTER "ATIYA"

Nikoleta Tzankova[1], Dobrinka Stavrakeva[2], Petar Leshtakov[3], Kalin Dimitrov[3]
[1] University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, niktzankova@abv.bg
[2] University of chemical technology and metallurgy, 1756 Sofia
[3] National Archaeological Institute and Museum – BAS, 1000 Sofia, junior_1_bg@yahoo.com*, kalin.d@abv.bg*

ABSTRACT. The ancient slags, found in the Rosen ore field were researched. They were collected from the surface of several ancient metal production centers located near the ancient mines in Medni rid. The mining of copper there is referred to the period 6th century B.C. – 4-5th century A.D. The chemical composition of the samples was determined based on data from ICP-OES. The slags have high Fe_2O_3 and SiO_2 content. Their mineral composition was studied with the help of optical microscope in transmitted and reflected light, with the methods of X-ray powder diffraction and with electron probe microanalyses. It was found that the slags consist mainly of iron-containing phases such as fayalite, magnetite, maghemite, wustite, kirschsteinite, presence of copper drops and copper-sulfide aggregates. The studied materials are defined as by-products, produced from the heat treatment of copper-iron sulphide ore for copper mining in ancient times.

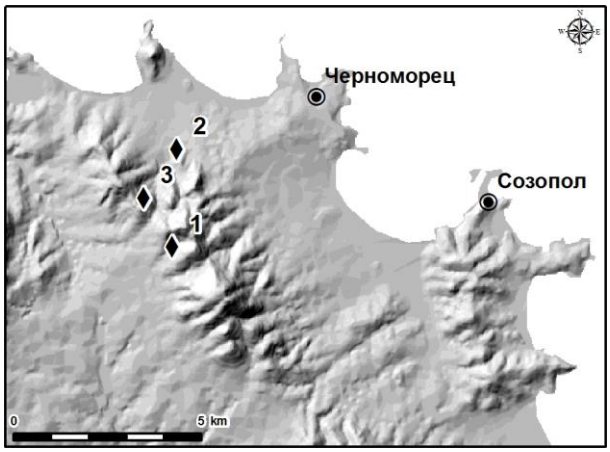
Key words: archaeometallurgy, ancient slags, copper, copper-sulfide aggregates, copper-oxide phases, iron-siliceous and iron-oxide phases

Въведение

Това изследване е продължение на химико-минераложката характеристика на древни шлаки от Росенското рудно поле (вж. настоящето издание). Изследваните в този труд образци произхождат от няколко металургични центрове, преработващи добитата през Античността руда в района на Медни рид (фиг. 1). Често липсата на визуални следи от получавания метал в отпадъчните продукти води до несигурно или погрешно археологическо определяне на добиваната суровина.

Древен металургичен център в нах. "Коручешме". Археологическият обект е открит при теренно издирване през 2010 г. (Лещаков, Класнаков, 2011; Лещаков, 2014). Разположен е в западните склонове на Медни рид с географски координати: 42°24'30,8"N; 27°35'29,9"E. На площ от около 15 дка са засвидетелствани големи количества металургична шлака, каменни хавани за стриване на руда, парчета от тухли с провлачвания от пръсти и камъни с червен цвят, в следствие на нагряване при много висока температура, с полепнала шлака върху някоя от повърхностите. Преотложените останки от металургични пещи и купчините от отработена скална маса свидетелстват за извършвана на място първична обработка и претопяване на руда. Откритите парчета шлака са с тъмносив цвят и висока плътност. При отделни образци се констатират повърхностни участъци със зелен цвят. Събраните от повърхността археологически материали позволяват функционирането на металодобивния обект да се отнесе към римския или късноантичния период. Произходът на използваната суровина с голяма доза

вероятност трябва да се свърже с мащабните древни изработки, регистрирани на около 300 m северно от металургичния център.



Фиг. 1. Карта на археологическите обекти, споменати в текста: 1 – металургичен център в находище "Коручешме"; 2 – металургичен център "Атия"; 3 – металургичен център в находище "Росен".

Древен металургичен център "Атия"

Археологическият обект е открит през 1971 г. по време на изследванията на Е. Черних (Черных, 1978). Той е разположен на югозапад от с. Атия, в северното подножие на хълма Зарбузан с географски координати: 42°25'55,1"N; 27°35'35,8"E. Строежът на съоръжения през втората половина на XX в., свързани със съвременната минна дейност, е нанесъл значителни поражения на металургичния обект. Археологически материали се откриват на площ от над 70 дка. Засвидетелствани са отвали от шлака, медна руда, части от металургични пещи и керамични фрагменти. При ранните изследвания на обекта са открити каменни съоръжения за обогатяване на руда (Черных, 1978). В северната част на обекта се откриват струпвания от шлака, които достигат до 2 m^3 (Лещаков, Класнаков, 2011).

Древен металургичен център в находище "Росен"

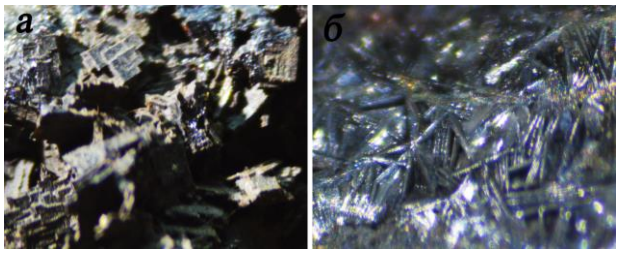
Археологическият обект е разположен на югозапад от бившето минно селище Росен, в подножието на Голям Росен баир с географски координати: 42°25'13,1"N; 27°34'56,6"E. Той се локализира върху отвала на древен рудник, споменаван неколкократно в научната литература (вж. Черных, 1978 и цитираната там литература). На терана са разкрити осем петна от парчета отухлена глина (някои от тях с лица) и червеникави камъни. Те имат неправилна форма с размери от 0,50 m до 1,50 m и представляват запазени *in situ* останки от металургични пещи. В близост до тях са открити парчета шлака. Подемният материал, събран от повърхността на древния рудник и металургичен център, е силно обезличен и позволява функционирането на комплекса да бъде поставено най-общо в Античността.

Цел на изследването е химико-минераложка характеристика на древни шлаки с оглед определяне на добивания метал и на основната руда, използвана за преработка.

Материал и методи на изследване

Изследвани са продукти от древна металодобивна дейност (шлаки), открити в околностите на находище "Коручешме" (проба 10 от металургичен център в района на находището и проба 11 от повърхностна минна изработка), от древен металургичен център край с. Атия (проба 14) и от района на нах. "Росен" (проба 16). Находища "Коручешме" (бивш рудник "Стаханов") и "Росен" са експлоатирани в периода 1945 -1995 г.

Изследваните шлаки са плътни, сиви на цвят, частично остъклени. Образците от проба 10 и проба 14 не реагират на магнит, за разлика от проба 11 и проба 16, които силно прилепват към магнит. Макроскопски в шлаките се наблюдават изометрични скелетни кристали от магхемит с кафяв цвят (фиг. 2а) и иглести фази със силен метален блясък (фиг. 2б). Върху повърхността на всички изследвани материали са развити вторични минерали: железни оксиди и хидрооксиди, хризокола и др.



Фиг. 2. Шлаки от района на нах. "Коручешме" и с. Атия: а – магхемит в шлака от проба 11, размер на видното поле 7 mm; б – иглести фази в шлака от проба 14, размер на видното поле 1,5 mm.

Продуктите от древна металодобивна дейност са изследвани оптично микроскопски в проходяща и отразена светлина с микроскопи Meiji MT9200 и MT9430 с камера DK1000. За определяне на фазовия състав на шлаките е проведена прахова рентгенова дифрактометрия на дифрактометър Bruker Phaser при параметри на изследване: Cu/Ni K_α лъчение в диапазона 2 Theta 4^0-70^0; 30 kV/10 mA; 0,2/0,5 s. Химичният състав на основните фази и на шлаковото стъкло са определени с рентгеноспектрални микроанализи (РСМА) на апарат JEOL LSM-6010PLUS/LA, оборудван с енергийно-дисперсионен микроанализатор с резолюция от 128 eV. Химичният състав на шлаките е определен с ICP-OES след високотемпературно алкално стапяне.

Кристалохимичните формули са изчислени по кислородния метод, описан в предидущите изследвания. Приложеният вариант на кислородния метод за изчисляване на кристалохимичните формули по данни от РСМА позволява да се определи относителният дял на Fe^{2+} и Fe^{3+} или на Cu^{+} и Cu^{2+}.

Химичен състав на шлаките

Изследваните образци се характеризират с високо съдържание на железни оксиди – от 53,96 до 66,07 mass %, относително повишено съдържание на SiO_2 – от 20,57 до 31,49 mass % и по-ниско съдържание на останалите

оксиди – най-често под 5 mass % (табл. 1). Във всички проби е определено присъствие на SO_3 и P_2O_5. Шлаките от района на нах. "Коручешме" (табл. 1 – проби 10 и 11) се отличават с високо съдържание на Fe_2O_3 (57,27 – 66,07 %), с най-ниски стойности на SiO_2 (20,57 – 23,75 %) и на свободна остатъчна мед (0,59 – 0,92 %) и с по-високи съдържания на CaO (3,17 – 5,57 %) в сравнение с останалите изследвани образци. Тези данни за химичния състав на шлаките от района на нах. "Коручешме" подсказват, че орудяването в района е било концентрирано във вместващи скали с по-високо съдържание на карбонатни минерали.

Таблица 1.
Химичен състав на древни шлаки от Росенския руден район по данни от ICP-OES анализи

Оксиди, wt %	Пр.10	Пр.11	Пр.14	Пр.16
SiO_2	20,57	23,75	31,49	28,74
TiO_2	0,23	0,44	0,27	0,10
Al_2O_3	4,62	5,99	4,62	3,93
Fe_2O_3	66,07	57,27	53,96	58,40
CaO	3,17	5,57	2,15	1,18
MgO	1,11	1,53	1,29	0,80
MnO	0,20	0,20	0,50	0,05
K_2O	1,01	1,05	0,91	0,77
Na_2O	0,24	0,43	0,31	0,13
P_2O_5	0,38	0,54	0,33	0,22
SO_3	0,79	0,63	0,74	0,65
Cu	0,92	0,59	1,97	1,38
З.Н.	0,18	0,27	1,37	0,56
Сума	99,49	98,26	99,91	100,91
Коеф. осн.	2,79	2,16	1,59	1,85

Коефициентът за основност, изчислен по формулата $(CaO+MgO+Fe_2O_3)/(SiO_2+Al_2O_3)$ за всички образци, е по-голям от единица (>1), което определя шлаките като основни. Тези отношения за изследваните проби са приведени съответно в таблица 1. Коефициентите за основност определят и вида на кристалните силикатни и оксидни фази.

Резултатите от микросондовите анализи на вместващата стъкловидна маса са приведени в таблица 2. В шлаковото стъкло присъстват всички компоненти, определени с ICP-OES. Освен тях с РСМА в някои от анаризираните точки е определено наличие на лантан, фосфор и по-рядко церий.

Таблица 2.
Химичен състав на шлаково стъкло по данни от РСМА

Ел. %	Пр.10,ан. 10.1.004	Пр.11,ан. 11.1.003	Пр.14,ан. 14.1.003	Пр.14,ан. 14.1.004	Пр.14,ан. 14.2.001	Пр.14,ан. 14.2.002	Пр.16,ан. 16.1.005
Si	16,586	19,275	31,546	29,360	28,109	48,028	19,978
Ti	0,001	0,064	0,075	0,104	0,023	–	–
Al	8,293	8,450	7,434	5,903	3,572	0,233	5,130
Fe	16,586	16,079	7,276	2,117	16,513	0,686	32,874
Mg	0,042	0,004	0,618	0,240	0,395	0,014	0,081
Ca	6,533	11,489	2,869	0,503	2,751	–	2,102
K	4,030	2,504	3,969	4,986	2,273	–	1,980
Na	2,052	1,280	2,150	1,740	1,506	0,309	0,654
Cu	0,029	–	0,119	0,150	0,356	0,060	0,205
S	0,092	0,164	0,004	0,007	0,005	0,015	0,014
P	0,447	0,509	0,013	0,004	0,017	0,019	0,139
La	0,060	0,104	0,106	–	–	–	0,134
Ce	–	0,146	–	–	–	–	–
O	36,935	39,032	43,821	54,886	44,480	50,635	36,705

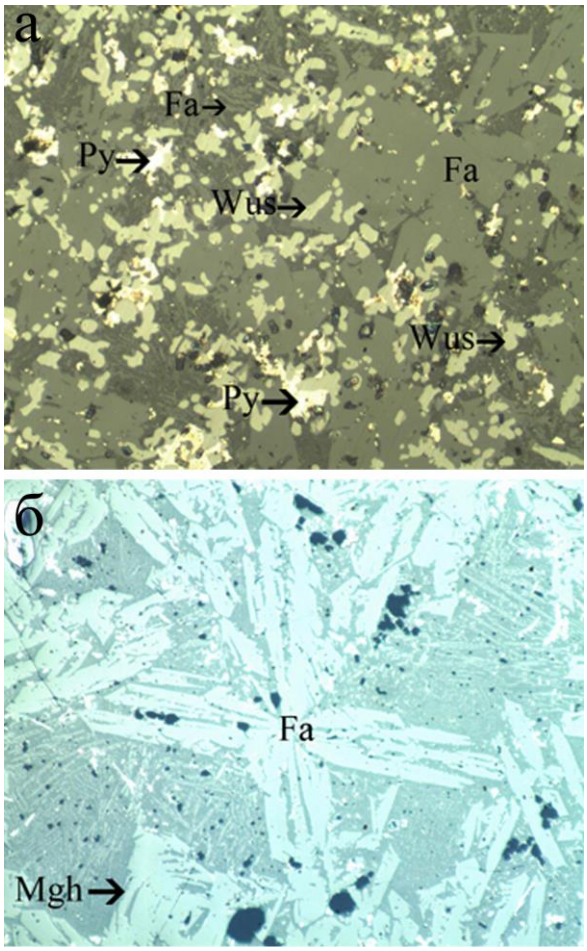
В пробите от района на нах. "Коручешме", в точки 10.1.004 и 11.1.003, се разкриват участъци с евтектична микроструктура, в които се наблюдават микролити в шлаковото стъкло. В тези участъци с РСМА се регистрира и най-високо съдържание на калций.

В проба 14, анализ 14.2.002 се установява шлаково стъкло, обогатено на SiO_2.

Фазово-минераложки състав на шлаките

Микроскопско изследване

Структурата на шлаката от проба 10 е еднородна, средно- до микрозърнеста с основни кристални фази от фаялит с различна големина и вюстит (фиг. 3а). И двете фази са доказани рентгенографски (фиг. 5). Сред шлаковото стъкло са разпръснати множество дребни и с по-висока отражателна способност кристали на пирит и пиротин.



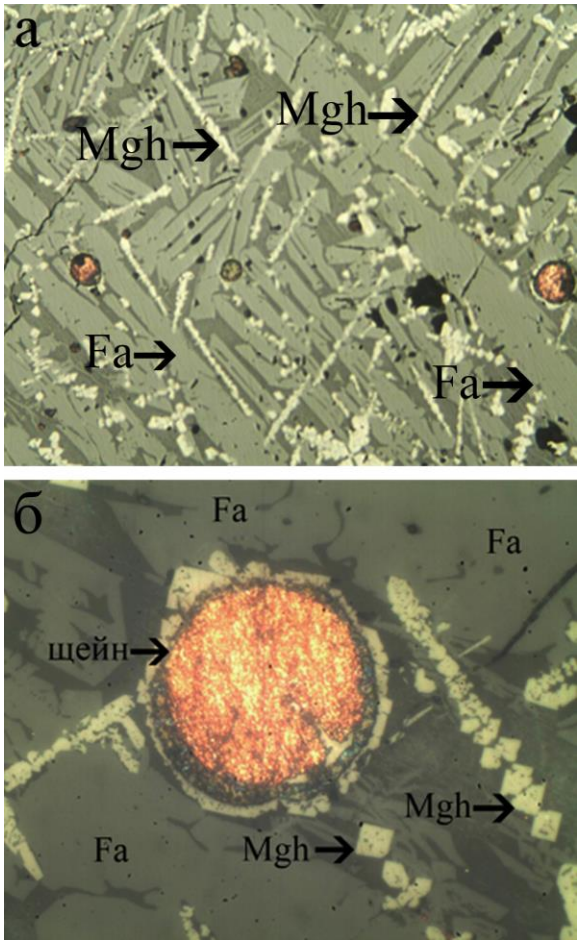
Фиг. 3. Микроскопски снимки на изследваните образци в отразена светлина: а – едри кристали от фаялит (Fa) с тъмносив цвят, вюстит (Wus) със светлосив цвят и пирит (Py) в шлака от проба 10, размер на видното поле 425 μm; б – фаялит, скелетни кристали от магхемит в проба 11, размер на видното поле 850 μm

Шлаката от проба 11 е с холокристална структура, резултат от бавно охлаждане. Наблюдават се едри удължени призматични кристали на фаялит, дендритни и скелетни форми на магхемит (фиг. 3б), доказани и с рентгенофазов анализ (фиг. 6). Сулфидните (щейнови)

агрегати са с неправилна форма и съдържат светла фаза – вероятно от халкопирит.

Проба 14 от металургичен център “Атия” е нееднородна, пореста. Представлява шлаково стъкло с множество ликвационни капки. Микролитите се състоят от две фази: по-светла – фаялит и по-тъмна – стъкловидна. В шлаковата маса се наблюдава фина кристализация. Липсват медни капки.

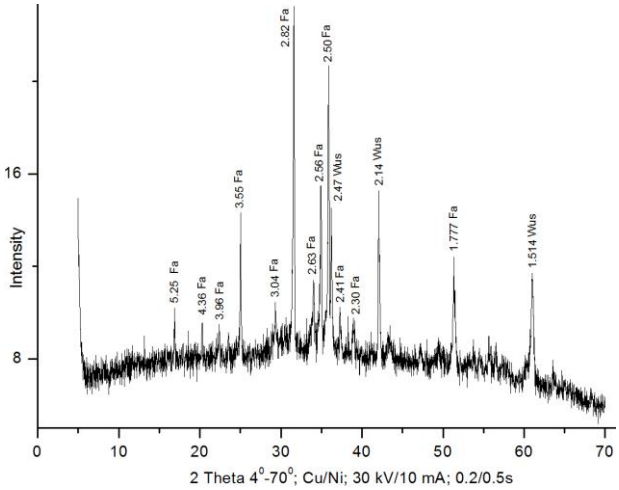
Шлаката от проба 16 (от района на нах. “Росен”) е с равномерна микрозърнеста холокристална структура. Количеството на кристалната фаза е над 80%. Наблюдават се фаялит и дребни почти бели зърна от магхемит (фиг. 4а, 4б) на места с дендритни форми, които са доказани и рентгенофазово (фиг. 8). Фаялитовите кристали са представени от скелетни удължени призматични прерези с характерни пъстри интерференционни цветове от втори порядък. Сулфидните (щейнови) агрегати са нееднородни, представени в периферните им части от халкопирит и заобиколени от магхемитови кристали (фиг. 4б). Наблюдават се единични медни капки с жълточервен цвят.



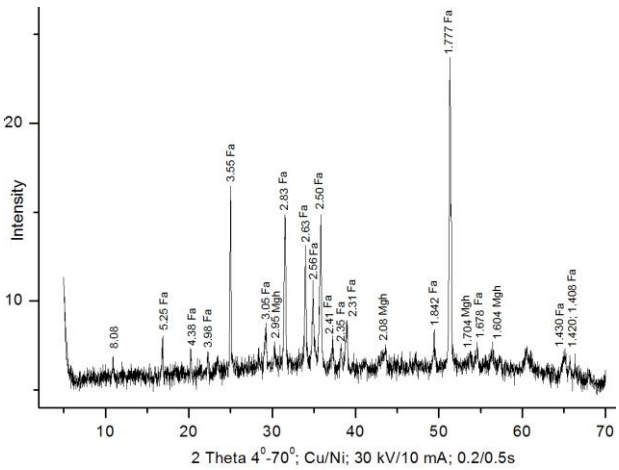
Фиг. 4. Микроскопски снимки на изследваните образци в отразена светлина: а – фаялит (Fa) с тъмносив цвят и магхемит (Mgh) със светлосив цвят в проба 16, размер на видното поле 850 μм; б – сулфидни (щейнови) агрегати, фаялит (Fa) и магхемит (Mgh) в проба 16, размер на видното поле 425 μм.

Рентгенофазово изследване

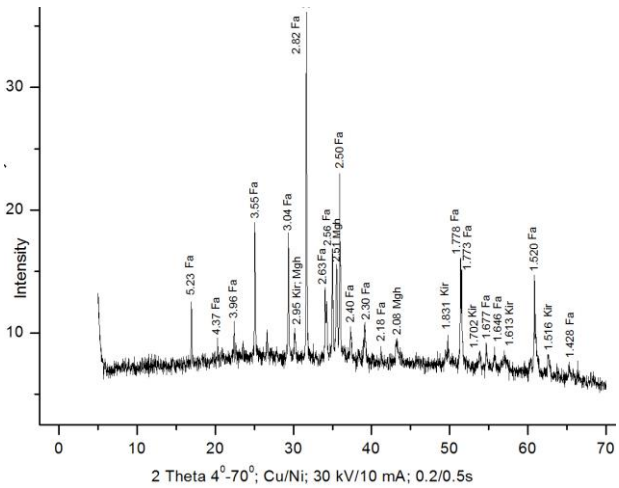
Изследваните проби от древен металодобив са изградени основно от желязосъдържащи минерали – фаялит, кирщайнит, вюстит и магхемит (фиг. 5-8).



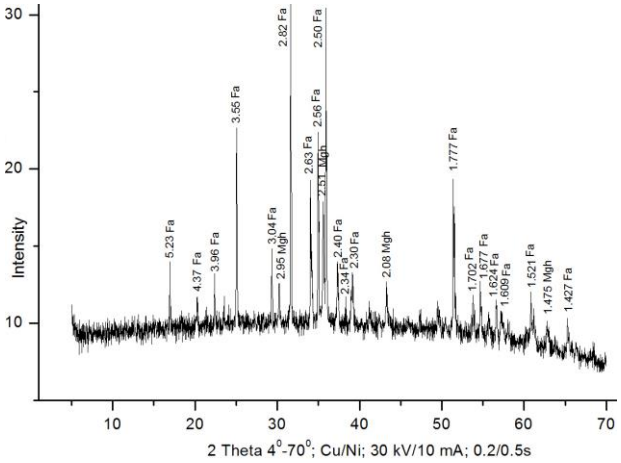
Фиг. 5. Прахова дифрактограма на шлака от района нах. “Коручешме” – проба 10: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; вюстит $Fe_{1-x}O$ (Wus) PCPDFWIN 46-1312



Фиг. 6. Прахова дифрактограма на шлака от района нах. “Коручешме” – проба 11: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; магхемит γ-Fe_2O_3 (Mgh) PCPDFWIN 39-1346



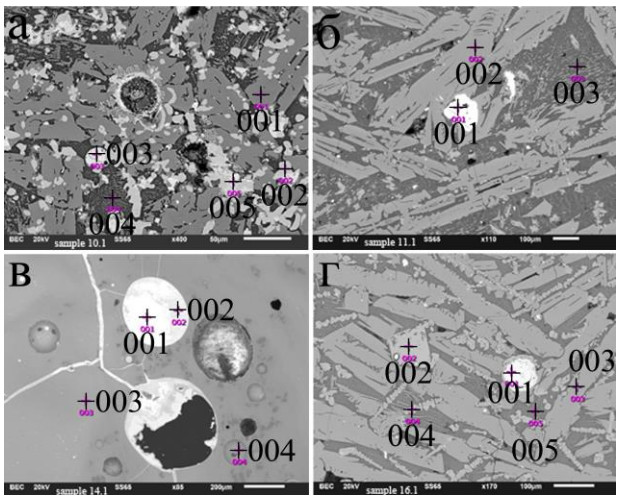
Фиг. 7. Прахова дифрактограма на шлака от района на металургичен център “Атия” – проба 14: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; магхемит γ-Fe_2O_3 (Mgh) PCPDFWIN 39-1346; кирщайнит (Fe-монтичелит) $CaFeSiO_4$ (Kir) PCPDFWIN 34-0098



Фиг. 8. Прахова дифрактограма на шлака от района на нах. "Росен" – проба 16: фаялит Fe_2SiO_4 (Fa) PCPDFWIN 34-0178; магхемит γ-Fe_2O_3 (Mgh) PCPDFWIN 39-1346

Минерален състав по данни от РСМА

Съставът на изследваните фази, установен с точков микросондов анализ (РСМА) са представени в таблици 3 – 8 и са означени на фигура 9.



Фиг. 9. Микрофотографии (СЕМ) на изследваните минерални фази от района на нах. "Коручешме", нах. "Росен" и металургичен център "Атия": а) проба 10 металургичен център южно от нах. "Коручешме", анализи 10.1.001 - фаялит, 10.1.002 - вюстит, 10.1.003 - щейнова капка, 10.1.004 - евтектична микроструктура на фаялит и шлаково стъкло и 10.1.005 - щейнова капка, x400; б) проба 11 нах. "Коручешме", анализи 11.1.001 - щейнова капка, 11.1.002 - фаялит и 11.1.003 - евтектична микроструктура (микролити в шлаково стъкло), x110; в) проба 14 от района на мет. център "Атия", анализи 14.1.001 - куприт, 14.1.002 - медножелезен оксид, 14.1.003 - шлаково стъкло и 14.1.004 - шлаково стъкло, x85; г) проба 16 от района на нах. "Росен", анализи 16.1.001 - медна капка, 16.1.002 - магнетит, 16.1.003 - фаялит, 16.1.004 - магхемит и шлаково стъкло, 16.1.005 - шлаково стъкло, x170.

Във всички изследвани шлакови образци от района на находища "Коручешме" и "Росен", както и от металургичен център "Атия" във вместваща стъкловидна фаза са установени желязо-силикатни, желязо-оксидни, медно-оксидни и медно-желязооксидни фази, сулфидни (щейнови) агрегати и капки от самостоятелна мед.

1. Желязо-силикатна фаза

Желязо-силикатната фаза е представена от фаялит, а в някои от образците и от кирщайнит, установени рентгенодифракционно и оптично микроскопски в отразена и в преминаваща светлина (фиг. 3-8). Кристалохимичните формули на фаялита са изчислени по данни от точковия микросондов анализ (табл. 3) и са представени по-долу.

Ан. 10.1.001:

$(Fe^{2+}_{1,79}\,Mg_{0,16}\,Ca_{0,04}\,Na_{0,01}\,Al_{0,01}\,La)_{2,01}\,Si_{1,05}\,O_4$

Ан. 11.1.002:

$(Fe^{2+}_{1,81}\,Mg_{0,21}\,Ca_{0,03}\,Al_{0,01}\,La_{0,01}\,Na)_{2,06}\,Si_{1,05}\,O_4$

Ан. 16.1.003:

$(Fe^{2+}_{1,97}\,Mg_{0,11}\,Na_{0,04}\,Al_{0,01}\,La, Ce)_{2,13}\,Si_{1,03}\,O_4$

Таблица 3.
Химичен състав на желязо-силикатни фази (фаялит) в по данни от РСМА

Проба, анализ	Елемент, %										
	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	Cu	P	La	Ce	O
Пр.10,ан. 10.1.001	14,715	0,223	49,815	2,019	0,929	0,169	–	–	0,232	–	31,898
Пр.11,ан. 11.1.002	14,616	0,104	49,937	2,528	0,580	0,045	0,116	0,036	0,391	–	31,598
Пр.16,ан. 16.1.003	14,018	0,136	53,314	1,248	0,095	0,046	0,029	–	0,088	0,091	30,925

Нестехиометричният състав в точка 16.1.003, вероятно се дължи на захванато малко количество от вместващата стъкловидна шлакова фаза. Освен това кристалните фази могат да се приемат структурно като дефектни, тъй като в състава им като изоморфни примеси се включват много от елементите-примеси участващи в състава на шлаката.

2. Желязо-оксидни фази

В шлаките са определени желязо-оксидни фази с химичен състав, представен в таблица 4.

Таблица 4.
Химичен състав на желязо-оксидни фази по РСМА данни

Проба, анализ	Елемент, %												
	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ca	Na	Cu	S	P	La	Ce	O
Пр.10,ан. 10.1.002	0,241	0,051	0,556	74,440	0,044	0,066	0,248	–	0,022	–	0,160	–	24,172
Пр.16,ан. 16.1.002	0,430	0,052	2,522	68,322	0,145	–	0,013	–	0,013	0,040	0,180	0,057	28,226
Пр.16,ан. 16.1.004	2,499	0,049	2,883	63,266	0,026	0,081	0,129	0,058	0,025	–	–	–	30,600

Фазата в проба 10.1.002 по химичен състав стехиометрично е най-близка до вюстит ($Fe_{1-x}O$) със следната кристалохимична формула:

$(Fe_{0,88}\,Al_{0,01}\,Ca, Mg, Ti, Na, La)_{1-x}\,O$

Химичният състав на фазата в точка 16.1.002 е най-близък до стехиометрията на магнетит с примеси от Al, Si, Mg,Ti, Na, S, P, La, Ce и е с кристалохимична формула:

$(Fe_{2,78}\,Al_{0,21}\,Si_{0,03}\,Mg_{0,01}\,Ti, Na, S, P, La, Ce)_{3,03}\,O_4$

Химичният състав в точка 1.004 в проба 16 е близък до γ-Fe_2O_3 (магхемит), Cu_2O и шлаково стъкло.

3. Медно-желязооксидна фаза

В някои анализирани точки се установява сложен медно-железен оксид със състав приведен в таблица 5.

Таблица 5.
Химичен състав на медно-железооксидна фаза по РСМА данни

Проба, анализ	Елемент, %							
	Si	Al	Fe	Ca	Cu	S	La	O
Пр. 14, ан.14.1.002	1,971	0,206	35,695	0,055	26,687	0,152	0,105	35,125

4. Медно-оксидни фази

В изследваните шлаки от района на нах. "Пропаднала вода" (вж. настоящия сборник) са определени медно-оксидните фази с присъствие на мед в различна степен на окисление. В шлаките от металургичен център "Атия" медно-оксидната фаза (ан. 14.1.001 от проба 14 – табл. 6) съответства по стехиометрия на $Cu^{+}_{2.055}O$ с малко шлаково стъкло. Излишъкът на мед се обяснява с фини включения на самостоятелна мед (Годовиков, 1975). В купритът могат да присъстват 0,*n* % Fe_2O_3, SiO_2, S, K и др.

Таблица 6.
Химичен състав на медно-оксидна фаза по РСМА данни

Проба, анализ	Елемент, %						
	Si	Al	Fe	K	Cu	S	O
Пр. 14, ан.14.1.001	0,206	0,112	0,010	0,015	88,775	0,004	10,877

5. Щейнови агрегати

В шлаките в отразена светлина се разкриват нехомогенни микроскопични агрегати (фиг. 4), съдържащи медни и железни оксидни и сулфидни фази, означавани с металургичната терминилогия като щейнови. Химичният състав на такива агрегати са представени в таблица 7.

Таблица 7.
Химичен състав на щейнови агрегати по данни от РСМА

Проба, анализ	Елемент, %							
	Si	Al	Fe	Mg	Cu	S	La	O
Пр. 10, ан.10.1.003	0,050	0,073	64,079	0,063	0,603	6,478	0,185	28,470
Пр. 10, ан.10.1.005	0,182	0,335	56,378	–	15,013	1,813	0,084	26,162
Пр. 11, ан.11.1.001	0,093	0,011	9,017	–	66,166	4,646	–	20,067

6. Самостоятелна мед

Във всички изследвани проби се наблюдават макро- и микроскопски сферични капки на самостоятелна мед, в които като примеси се съдържат малки количества от другите компоненти. Състав на такива капка по данни от микросондовия анализ е приведен в таблица 8.

Таблица 8.
Химичен състав на медна капка по данни от РСМА

Проба, анализ	Елемент, %				
	Si	Al	Cu	S	O
Пр. 16, ан.16.1.001	0,227	0,080	98,186	0,057	0,552

Заключение

Като резултат от проведените химико-минераложки изследвания на древни шлаки се доказа древна металургична дейност в районите на находища "Коручешме" и "Росен", както и в околностите на с. Атия (мет. център "Атия"). За добивания метал може да се съди по наличието на макро- и микроскопични сферични капки на свободна мед от преработката на медно-сулфидна суровина, вероятно халкопирит и борнит, за което свидетелстват наличните щейнови капки. В изследваните шлаки са определени фази с високо съдържание на желязо като фаялит и кирщайнит, железо-оксидни (магхемит, вюстит и магнетит) и медно-оксидни (куприт) фази, които са характерни за съвременните шлаки на медодобивната металургия (Ставракева и Стоицева, 1966; Иванов и др., 1967; Михайлова, 2009). Преработката на рудата се е извършвала както на място, в непосредствена близост до рудните жили, така и в металургични центрове, означавани от нас като "Коручешме" и "Атия". Характеристиките на изследваните отпадъчни продукти от топенето на метал подсказват извършването на металодобив с различна степен на извличане на мед, свидетелстващ за постепенно усъвършенстване на металургичния процес и въвеждане на нови технологии.

Откритите при издирванията археологически материали подкрепят направените наблюдения и на този етап на изследване свидетелстват за дълготрайното функциониране на металургичните центрове от първата половина на I хил. пр. Хр. до средата на I хил. сл. Хр. Рудата, използвана за добива на метал, вероятно произхожда от няколко древни мини, локализирани в близко разположените медни нах. "Коручешме" и "Росен".

Благодарности. Изследванията са проведени по проект ДФНИ К02/6 от 12 декември 2014г. Авторите на настоящото изследване изказват благодарност на всички членове на колектива на проекта, съдействали за намиране и локализиране на древни металургични шлаки.

Литература

Годовиков, А. А. *Минералогия*. Изд. Недра, Москва, 1975. - 141 с.

Иванов, И., П. Бакарджиев, И. Грозданов. Фазов състав и структура на отпадъчните медни шлаки от МДК "Г. Димитров" – гр. Пирдоп – *Рудодобив и металургия,* 1967. - 9.

Лещаков, П. Издирвания на археологически обекти в Медни рид. – *Археологически открития и разкопки през 2013 г.* С., 2014. - 653-655.

Лещаков, П., М. Класнаков. Теренни археологически издирвания в Медни рид. – *Археологически открития и разкопки през 2010 г*. С., 2011. - 582-585.

Михайлова, И. Изследване на фазовия състав и структурата на пещни металургични шлаки от производството на мед. – *Год. на МГУ "Св. Ив. Рилски",* т. 52, 2009. - 73-78.

Ставракева, Д., Р. Стоицева. Химико-петрографска характеристика на отвалните шлаки от ДММП "Г. Димитров" – гр. Елисейна – *Рудодобив и металургия, кн. 2,* 1966.

Черных, Е.Н. *Горное дело и металлургия в древнейшей Болгарии*. С., БАН, 1978. - 387 с.

Статията е рецензирана от доц. д-р Ирена Михайлова и е препоръчана за публикуване от кат. "Минералогия и петрография".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

CARTOGRAPHIC SUPPORT OF ASPIRING GEOPARK BELOGRADCHIK ROCKS

N. Kalutskova[1], D. Sinnyovsky[2], N.Telnova[1], N. Dronin[1], D. Useinova[1]

[1] Moscow State University "M. V. Lomonosov", Moscow, nat_nnk@mail.ru
[2] University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, sinsky@mgu.bg

ABSTRACT. The new territory of the first Aspiring UNESCO Geopark in Bulgaria, Belogradchik rocks, comprises three municipalities in Northwest Bulgaria in Vidin region between Bulgarian-Serbian border and the Danube. The new concept of geopark emphasizes the importance of geotourism and other alternative forms of sustainable tourism. Tourism activities can actively promote to get acquainted with geologic and landscape features of the region. In relation to the main objectives of the proposed geopark we have elaborated a new informational support based on geospatial data and thematic maps. These data can be organized in three blocks: base geospatial data, thematic data and tourism data. Base data include digital elevation model, hydrography, populated places, road network and so on. Thematic maps relate to geologic and landscape diversity and reflect geologic structure, locations of geosites, landscape types, land cover classes according to CORINE landcover 2012 and areas of high nature value. Tourism data comprise georeferenced bicycle routes, pedestrian tracks and ecological tracks. All these geospatial data have been compiled in the single geodatabase and visualized at a scale 1:300 000.

Key words: aspiring geopark Belogradchik rocks, geospatial data, thematic maps, natural landscape, land use, tourist routes, tourist attraction

КАРТОГРАФСКА ПОДДРЪЖКА НА КАНДИДАТСТВАЩИЯ ГЕОПАРК БЕЛОГРАДЧИШКИ СКАЛИ

Н. Калцукова[1], Д. Синьовски[2], Н. Телнова[1], Н. Дронин[1], Д. Юсеинова[1]
[1] Московски държавен университет „М. В. Ломоносов", Москва, nat_nnk@mail.ru
[2] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, sinsky@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Територията на първия кандидатстващ в ЮНЕСКО български геопарк Белоградчишки скали включва три общини от Видинска област - Северозападна България между Сръбско-Българската граница и ,р. Дунав. Новата концепция за геопарка набляга на важността на геотуризма и другите форми на устойчив туризъм. Туристическите дейности могат активно да насърчават запознаването с геоложките и ландшафтни особености на района. Във връзка с основните цели на предлагания геопарк е разработена нова информационна основа, базирана на геопространствени данни и тематични карти. Тези данни могат да бъдат организирани в три блока: основни геопространствени данни, тематични данни и туристически данни. Основните данни включват дигитален височинен модел, хидрография, населени места, пътна мрежа и т. н. Тематичните карти се отнасят до геоложкото и ландшафтно разнообразие и отразяват геоложките структури, местоположението на геотопите, ландшафтните типове, класовете на почвената покривка съгласно CORINE landcover 2012 и площите с висока природна стойност. Туристическите данни включват георeферирани веломаршрути, пешеходни пътеки и екопътеки. Всички тези геопространствени данни са компилирани в единна геобаза данни и визуализирани в мащаб 1:300 000.

Ключови думи: кандидатстващ геопарк Белоградчишки скали, геопространствени данни, тематични карти, природен ландшафт, земеползване, туристически маршрути, туристически атракции

Introduction

Nowadays there is a quite new nomination standard for inscribing Belogradchik rocks into list of European geoparks. The new nomination standard demands for a necessary set of thematic maps for the territory proposed as a geopark. However there aren't any conventional rules of cartographic support for European geoparks. Besides essential geologic maps some more thematic maps can be proposed for the support of ecotourism and functional zoning at the territory of aspiring geopark. These proposed maps are:

1) The map of natural landscapes and objects of high nature conservation value
2) Land use/land cover map of aspiring geopark
3) Map of tourist routes and different attracted sites for sustainable tourism and geotourism.

Materials and methods

The new three thematic maps for the territory of the aspiring geopark were elaborated by means of different geospatial data in ArcGIS for Desktop software. Initial geospatial data were obtained originally as ~~a~~ scientific results of our perennial and detailed field surveys or imported from open and well-known European and global datasets. All thematic data were organized in three blocks (Table 1). Initial scales of all data are from 1:100 000 to 1:300 000.

All the data were georeferenced, reprojected and compiled in a single geodatabase in the form of thematic layers. It allows to conduct further geospatial analysis and create visualization of data in the form of thematic maps.

Table 1.
Geodatabase of basic and thematic geospatial data for the territory of the aspiring geopark

GIS layers	Source of geospatial data
Basic layers	
isohypses peaks height marks rivers lakes roads rails settlements	Digital elevation model Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global Topographic maps, scale 1:100 000
Municipalities Border of geopark	GADM database of Global Administrative Areas
Thematic layers	
Geologic and landscape diversity	
Natural landscapes	Remote sensing data (LANDSAT 8 OLI), field survey, original map
Outcrops	Topographic maps, scale 1:100 000
Geologic structures (stratigraphy)	Geologic map of Northwestern Bulgaria, scale 1:100 000 (original map)
Geologic structures (lithology)	Geologic map of Northwestern Bulgaria, scale 1:100 000 (original map)
Objects of high nature conservation value	Natura 2000 data - the European network of protected sites (EEA, 2016)
Contemporary land use/land cover	
Land use types	CORINE Land Cover European seamless 100m raster database CLC12
Tourist infrastructure	
Biking routes of different levels of complexity	Map "Bike trails in western Balkans Bulgaria and Serbia", scale 1:90 000
Ecotracks	Field georeferenced data (GPS tracks)
Geosites of different objective value, incl. cultural attractions	Original field survey, georeferenced data.
Caves	Atlas of caves in Belogradchik region (2009)

Results and discussion

Natural Landscape Map

For the territory of the aspiring geopark 11 types of natural landscapes can be defined based on geologic and geomorphologic general features and peculiarities (Figure 1). According to the scheme of natural regions (elaborated by Velchev, Todorov and Penin, cited by Penin, 2007) Northwest Bulgaria is divided in four regions: 1, Danubian-Dobrudzhian, 2. South Danubian and Ludogorian, 3. Subbalkanian,4. Stara Planina.

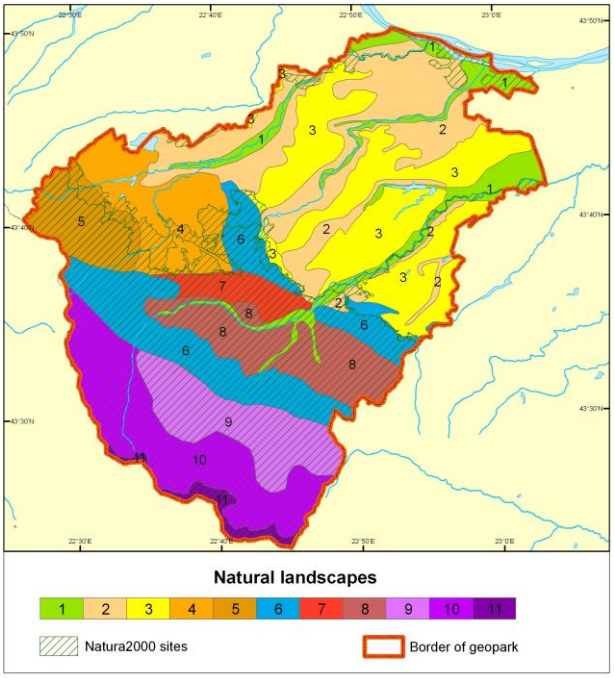


Fig. 1. Natural landscapes and Natura 2000 sites. Initial scale 1:300 000

The two former mentioned natural regions include 3 types of landscapes. The youngest ones are landscapes of contemporary river valleys (Archar, Skomlya, Lom and its tributaries Stakevska and Chuprenska) with alluvial stratified soils under poplar-willow forests (№1 at the Figure 1). Also on the Danube plain we have defined the remnant hilly plains formed on Neogene sandstones with dominantly tilled sod soils (№2) and the landscape of hilly eroded loess plains with black earth under arable lands (№3).

Fore-Balkan region have the highest landscape diversity with 5 types of landscapes. These are: ridged plains on Lower Carboniferous granitoids and argillites with brown forest soils under arable lands and fallows (№4); hilly uplands on Carboniferous carbonate rocks and siltstone with grey forest soils under oak forests with oriental hornbeam (№5); cuestas on Permian and Mesozoic limestones and marls with mountainous rendzines under oak-hornbeam-beech forests (№6); submontane landscapes on Triassic red bed rocks with brown forest soils under oak forests (№7); submontane landscapes on Ordovician conglomerates and schists with grey forest soils under oak forest with rich understory, arable lands and fallows (№8).

Region of Stara Planina encompasses 3 types of landscapes: low mountains on Carboniferous and Permian granites, gneisses with grey forest soils under oak and oak-hornbeam forests (№ 9); middle mountains on Carboniferous and Permian diorites, granodiorites and gneisses under beech and coniferous-beech forests (№10); hish mountains on Carboniferous and Triassic crystalline rocks with rankers under subalpine grasslands and shrublands (№11).

Sites of high nature conservation value i.e. Natura 2000 sites are also shown at the landscape map (Figure 1). These sites locate in the southern part of the aspiring geopark in submontane and mountain parts. Natura 2000 sites encompass landscapes of high, middle and low mountains, cuestas and ridged plains. They also include contemporary river valley of Lom in the east and Archar in the west. Part of the Danube valley belongs to Natura 2000 sites. Sites of Natura 2000 represent different and valuable forest habitat. Secondary mixed or oriental hornbeam forests have high scenic value. Primary forests in submontane landscapes (with *Quercus petraea*, *Q, pubescens* and *Q. cerris*) and in middle mountains (with *Picea abies*, *Abies alba*) have high conservational value. Along small river valleys primary small-leaved forests (with poplar and willow) are conserved.

Land use/land cover map

Contemporary land use/land cover map is created according CORINE Land Cover dataset (2012) (Figure 2). CORINE land cover classes can be interpreted as functional land use types with regard to landscape structure and economic specific of the geopark's territory.

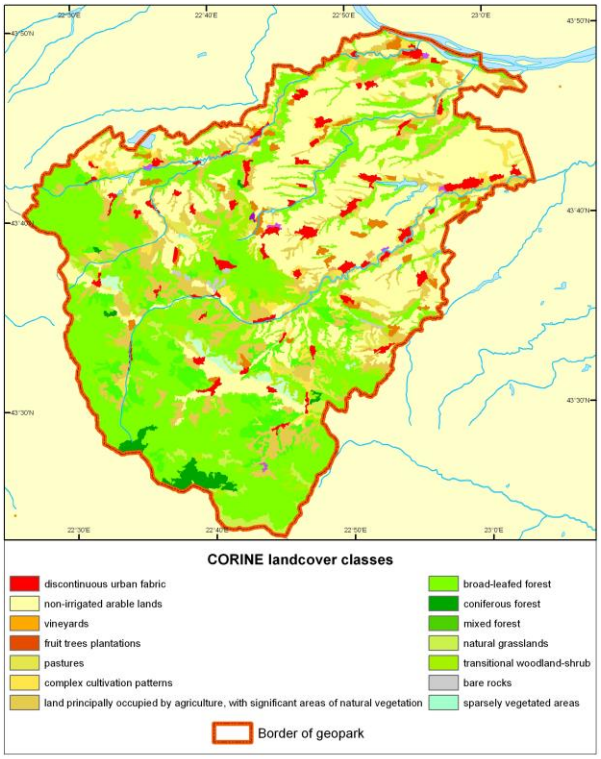


Fig. 2. Contemporary landcover (according to CORINE landcover dataset, 2012). Initial scale 1:300 000

Aspiring geopark is characterized with 14 land use types aggregated in four groups: 1 - Discontinuous urban fabric, 2 - Agricultural lands (arable lands, pastures, complex cultivation patterns, lands principally occupied with agriculture with significant area of natural vegetation and natural grasslands); 3-Forested lands (coniferous, mixed or broad-leaved forests, transitional woodland-shrub); 4 - Unusable or unsuitable lands (bare rocks, sparsely vegetated areas in sharp ridges of cuestas or in high mountains).

Discontinuous urban fabric class is widely distributed across the territory except for high mountains.

Arable lands dominate in landscape of hilly eroded loess plains with chernozems, where they occupy 201.5 ~~sq.~~ km^2. The great share of arable lands is typical for the landscapes of remnant hilly plains (89 km^2) and contemporary river valleys (48.8 km^2).

Pastures prevail in cuestas (12.5 km^2) and in submonatne landscapes (6.7 km^2).

Complex cultivation patterns have as a whole small areas and only in submontane landscape they occupy 2.8 km^2.

Lands principally occupied with agriculture with significant area of natural vegetation is a dominant land use type in submontane landscape on Triassic red bed rocks (4.6 km^2), and on ordovik conglomerates and schists (19.9 km^2).

Natural grasslands occur only in high mountains (7.4 km^2).

The predominance of broad-leaved forests is marked in middle mountains (127 km^2) and for the landscapes of low mountains and hilly uplands (55 km^2 in each of them).

Coniferous forests cover the majority of high mountains (6 km^2).

Low mountains are mainly occupied with mixed forests (19.9 km^2).

Transitional woodland and shrub are mostly typical for cuestas. In this landscape their area is 21.2 km^2.

Bare rocks have the most significant occurrence (2.2 km^2) in submontane landscape on triassic red bed rocks.

Sparsely vegetated areas occupy 10.8 km^2 in cuestas and less than 1 km^2 in high mountains.

Tourist infrastructure

Tourist infrastructure map represent geospatial data on current tourist routes and different tourist attractions (Figure 3). Existing and supporting tourist routes in the territory of aspiring geopark are ecotracks and biking routes of several complexity levels.

Five just elaborated and supported ecotracks are named "Vedernik", "Zbegove", "Lepeniza", "The world of rocks" and "Planiniza". In regard to natural landscape diversity all the tracks are concentrated in submontane landscape on triassic red bed rocks with brown forest soils under oak and oak with oriental hornbeam forests. The most eastern track ("Planiniza") and the most western one ("Vedernik') also touch cuestas landscape.

Biking routes encompass the far greater territory, they haven't original names but can be classified according three levels of complexity into routes of low, medium and high complexity. Due to the significant length the each biking route meets several natural landscapes and thus the network of biking routes can support the acquaintance with the whole landscape diversity of the geopark. For example the route traversing the landscape of ridged plains on low carbon granitoids and argillites with brown forest soils under arable

lands and fallows along settlements of Dubravka, Rabisha and Stupiza in the west of geopark then near Rabisha settlement it meets the landscape of remnant hilly plains formed on neogen sandstones with dominantly tilled sod soils.

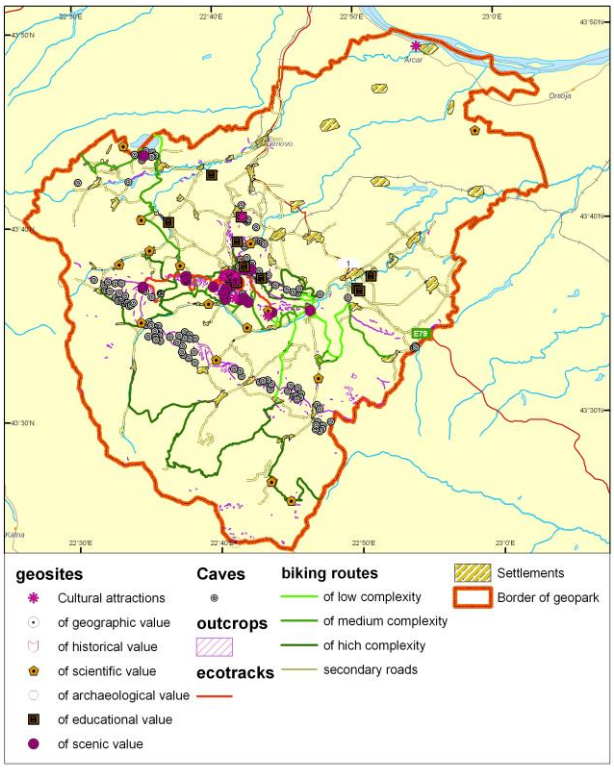


Fig. 3. Tourist attractions and routes. Initial scale 1:300 000

The landscapes of contemporary river valleys and submontane landscape on ordovik conglomerates and schists are touched by biking route near Protopopinzy settlement in south-eastern corner of geopark's territory. The segment of the biking route between Oreshetz and Vyrbovchez in the centre of geopark traverses landscape of hilly eroded loess plains.

Mountain landscapes are also well-represented in biking routes network: the landscape of middle mountains on carbon and permian diorites, granodiorites and gneisses under beech and coniferous-beech forests near Chuprene and landscape of middle mountains on carbon and permian diorites, granodiorites and gneisses under beech and coniferous-beech forests near Stakevtzy settlement. Only landscapes of high mountains aren't covered with any biking route.

Georeferenced tourist attractions include 75 geosites and 115 caves revealed us during detailed field survey of the geopark's territory. Revealed geosites are grouped according their objective value in several categories (Table 2).

Among revealed geosites 12 cultural attractions have a great interest not only for geotourism and scientific tourism but for sustainable tourism as a whole. All the cultural attractions are located near Belogradchik city and its closest neighborhood. Their list includes some museums, the observatory, churches and mosques. The most significant object is Roman castle "Kaleto".

Table 2.
Number of geosites of different objective value

category according objective value	*number of geosites*
geographic value	1
scientific and archaeological value	1
historical value	3
mixed scientific and educational value	4
mixed scientific and scenic value	4
educational value	10
Cultural attractions	12
scientific value	17
scenic value	23
Total	75

Conclusion

The geopark can be considered as a specific protected area of multiobjective type and in thus it needs for complex and strong cartographic support under the process of its justification and further functioning. One of the key objective of the geopark is social and economic enhancement of the whole region where it is located. That's why necessity of clear representation of current land use structure and existing tourist resource in the territory of aspiring geopark Belogradchik rocks is conclusive.

References

CORINE Land Cover European seamless 100m raster database CLC12. Version 18.3. Available at http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012 [Acessed 7.07.2016]

GADM. Global administrative areas. Boundaries without limits. Available at http:// http://gadm.org [Acessed 7.07.2016]

Leonidov, A.., Trifonov (eds.). *Atlas of caves in Belogradchik region.* Sofia, PAL, 2009. – 36 p. (in Bulgarian)

Map "Bike trails in western Balkans Bulgaria and Serbia", Agency for Regional Development and Business center – Vidin, 2013. M 1:50 000 (in Bulgarian).

Natura 2000 data - the European network of protected sites. EEA, Availlable at: http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-7#tab-european-data [Acessed 7.07.2016], 2016.

Penin R. *Landscape geography of Bulgaria.* Sofia, Bulvest, 2007. - 279 p. (in Bulgarian)

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Available at http://eartexplorer.usgs.gov [Acessed 7.07.2016]

The article is reviewed by Prof. Dr. Jordan Kortenski and recommended for publication by "Geology and Geoinformatics" Department.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

INTERNATIONAL PROSPECTS OF THE ASPIRING GEOPARK BELOGRADCHIK ROCKS

Dimitar Sinnyovsky[1], Natalia Kalutskova[2], Nikolai Dronin[2], Valentina Nikolova[1]

[1] University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, sinsky@mgu.bg
[2] Moscow State University "M. V. Lomonosov", Moscow, nat_nnk@mail.ru

ABSTRACT. Geopark Belogrdchik rocks passed through another unsuccessful application for Global Geoparks, although all instructions of the previous UNESCO mission were implemented. According to these recommendations a new concept of the geopark was developed including establishment of a management body, expanding of the geopark area, and scientific description of at least 50 geosites of aesthetic, scientific and cultural value. Since then geopark has come a long way to its present state of Aspiring UNESCO Geopark. First of all geopark area was enlarged to the territory of 1373 sq. km between Bulgarian-Serbian border and Danube including four municipalities Belogradchik, Dimovo, Chuprene and Ruzhintsi. A new management body of the geopark was established - nongovernmental organization Association for Development of North-West (ADNW) registered by three municipalities Belogradchik, Dimovo and Makresh. Over the past four years the geopark area has undergone significant scientific investigations. First of all a solid geodatabase was developed, including geodiversity description, scientific dossiers of 72 geosites, and geological map of the area. The application dossier was applied in November 2014 and the mission of UNESCO was conducted at the end of June and the beginning of July, 2015. On 30 September 2015 the Global Geoparks Network Bureau inform us that at its meeting on 18 September has discussed the evaluation of our application and decided that at this stage Geopark Belogradchichik rocks has not yet reached sufficient maturity to be declared a Global Geopark, and asked all stakeholders at Belogradchik to work for at least two more years on establishing a strong Global Geopark. The main reasons for the unsuccessful application could be summarized as follows: increasing requirements of the Global Geoparks Network, missing action plan, refusal of Chuprene and Ruzhintsi municipalities to participate in the ADNW, and refusal of the Ministry of Environment and Water to support preliminary activities prior to the UNESCO mission concerning geopark infrastructure: information panels with interpretation of the geological history for the general public, geotrailes, information centres. The new concept of the geopark will be developed on a strong agreement between the participating municipalities, state support of the geopark activities, clear geopark funding, management plan for development of the geopark area, sustainable regional development policy strategy and importance of geotourism and other alternative forms of tourism – ecotourism, rural tourism, cultural tourism. It will be also developed considering the common requirements for conservation, protection and promotion of natural and cultural heritage sites and monuments, in areas hosting significant natural heritage of international importance through the establishment of aspiring UNESCO Global Geoparks in the light of the new International Geoscience and Geoparks Programme (IGGP) of UNESCO.

Key words: Aspiring Geopark Belogradchik rocks, UNESCO Global Geoparks

МЕЖДУНАРОДНИ ИЗМЕРЕНИЯ НА КАНДИДАТСТВАЩИЯ ГЕОПАРК БЕЛОГРАДЧИШКИ СКАЛИ

Димитър Синьовски[1], Наталия Калуцкова[2], Николай Дронин[2], Валентина Николова[1]
[1] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, sinsky@mgu.bg
[2] Московски държавен университет „М. И. Ломоносов", Москва, nat_nnk@mail.ru

РЕЗЮМЕ. Геопарк Белоградчишки скали премина през още една неуспешна кандидатура за Глобален геопарк, въпреки че бяха изпълнени всички указания на предишната мисия на ЮНЕСКО от 2010 г. Съгласно тези препоръки бе разработена нова концепция за геопарка, включваща създаване на управително тяло, разширяване територията на геопарка и научно описание на поне 50 геотопа с естетическа, научна и културна стойност. Оттогава геопаркът извървя дълъг път, за да достигне сегашното си състояние на кандидатстващ ЮНЕСКО Геопарк. Преди всичко площта бе разширена до 1373 km^2, разположени между сръбско-българската граница и р. Дунав, включваща четири общини: Белоградчик, Димово, Чупрене и Ружинци. Създаден бе управителен орган на геопарка - неправителствена организация Сдружение за развитие на северозапада (СРСЗ) регистрирана от общините Белоградчик, Димово и Макреш. През последните четири години площта на геопарка претърпя значителни научни изследвания. Преди всичко бе разработена солидна геобаза данни, включваща описание на георазнообразието, научни досиета за 72 геотопа и геоложка карта на района. Апликационното досие бе подадено през ноември 2014 г., а мисията на ЮНЕСКО се проведе в края на юни и началото на юли, 2015 г. На 30 септември 2015 г. Бюрото на глобалните геопаркове ни информира, че на заседанието си на 18 септември 2015 г. е обсъдило нашата молба и е решило, че на този етап геопарк Белоградчишки скали все още не е достигнал достатъчна зрялост, за да бъде обявен за Глобален геопарк и изиска всички заинтересовани страни в Белоградчик да работят най-малко още две години за създаване на силен глобален геопарк. Като основни причини за неуспешната кандидатура, могат да се посочат нарастващите изисквания на Глобалните геопаркове, липсата на план за управление, отказът на общините Чупрене и Ружинци да участват в СРСЗ и отказът на Министерството на околната среда и водите да подкрепи предварителните дейности преди мисията на ЮНЕСКО относно инфраструктурата на геопарка: информационни табла с тълкуване на геоложката история за широката общественост, създаване на геопътеки и информационни центрове. Новата концепция за геопарка ще бъде разработена въз основа на сигурно споразумение между участващите общини, държавна подкрепа за дейностите на геопарка, ясно финансиране, план за управление на площта на геопарка, устойчива регионална политика и стратегия за развитие и разработване на геотуризъм и други форми на алтернативен туризъм – екотуризъм, селски туризъм, културен туризъм. Тя също така ще бъде разработена съгласно общите изисквания за консервация, опазване и популяризиране на обектите на природното и културното наследство, в области със значимо природно наследство с международно значение чрез създаване на кандидатстващ Глобален геопарк на ЮНЕСКО в светлината на новата Международна програма на ЮНЕСКО за геонауки и геопаркове.

Ключови думи: Кандидатстващ геопарк Белоградчишки скали, Глобални геопаркове на ЮНЕСКО

Introduction

Geoparks are territories with particular geological heritage and sustainable territorial development strategy. These are areas of interest for scientific research and education but also aim to provide the necessary conditions for development of natural and cultural tourism. The newly proposed concept of Geopark Belogradchik rocks (Sinnyovsky, 2014a) is based on the famous natural monument "Belogradchik rocks" near the town of Belogradchik, situated on the territory of 1373 sq. km between the ridge of the West Balkan and the Danube in NW Bulgaria (figs. 1, 2). The applying area covers southeast part of Vidin district, including four municipalities: Belogradchik, Dimovo, Chuprene and Ruzhinci where the natural beauty of the geological phenomenon Belogradchik rocks is supplemented by geosites of scientific and cultural value.

Fig. 1. Administrative map of Vidin District with the application area (2015): 1 – Geopark area; 2 – State border; 3 – District boundary; 4 – Municipal boundary; 5 – District centre; 6 – Municipal centre

The southwest part of the area has an alpine landscape, while its northeast part is a hilly plain. In this area three morphological zones can be distinguished, whose boundaries are largely predetermined by the existing tectonic units (fig. 2):

- Balkan - medium to high alpine relief with altitude of the highest peaks over 2000 m;
- Fore-Balkan - transient low mountain relief, typical of the northern peripheral parts of the Balkan chain with highest peaks 900-1100 m;
- Danube Plane - hilly plain relief with altitude gradually reduced to 30 m at the Danube.

The Balkan zone is composed mainly of Neoproterozoic and Early Paleozoic metamorphic and igneous rocks. This is the true Balkan part of the area with typical alpine relief: steep peaks and deep valleys. Midzhur Peak (2168 m) at the Serbian-Bulgarian border is the highest peak of Serbia.

The Fore-Balkan zone is composed of Paleozoic and Mesozoic rocks. It coincides entirely with the large Belogradchik anticline. In its core Paleozoic and Triassic rocks are exposed and the limbs are composed of strong Upper Jurassic – Lower Cretaceous limestones, forming an impressive inverse relief. The Fore-Balkan unit is represented by ridges, plateaus, hills, valleys and gorges. The highest peaks in this unit are located on the protruding limestone ridges building the anticline limbs with NW-SE direction, cut by deep gorges of Stakevska, Chuprene and Lom rivers, originating from the West Balkan.

Fig. 2. Satellite map of the area

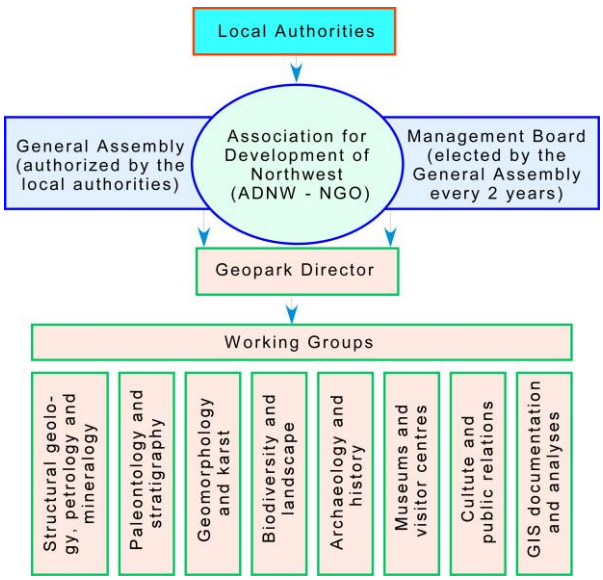


Fig. 3. Organigram of the proposed Geopark (Sinnyovsky, 2014a,d)

The Danube Plane is a part of the Moesian platform. It has a flat and hilly terrain with an average altitude of 130 meters crossed by up to 100 m deep river valleys of Archar, Skomlya and Lom rivers with SW-NE direction. It is composed mainly of Neogene and Quaternary sediments.

According to the previous recommendations of UNESCO mission - 2010 to establish a management body, non-governmental organization Association for Development of North-West (ADNW) was registered to coordinate the geopark activities and to promote the application of the area with adaptive structure designed to geopark management (fig. 3) (Sinnyovsky, 2014d).

Regional geological setting and geodiversity

Diverse geological structure of each applying area is an important prerequisite for evaluation and development of a geopark. It should comprise a number of internationally important geological heritage sites or a mosaic of geological entities of special scientific importance, rarity or beauty (Guidelines and Criteria for National Geoparks, 2007). A UNESCO Global Geopark must contain geology of international significance which is independently evaluated by scientific professionals in the relevant discipline of Earth Science (Statutes of the IGGP Programme, 2015). The application dossier for membership in the Global Geoparks should include general geological information for the proposed geopark area. Moreover, annex 2 (Section B "Geological setting" of the application dossier) is required as an additional and separate copy for geological desktop evaluators, presented separately from International Union of Geological Sciences (IUGS) of UNESCO.

The proposed geopark area near Belogradchik town includes parts of four major tectonic zones: West Balkan, West Fore-Balkan, Kula zone and Moesian platform (fig. 4).

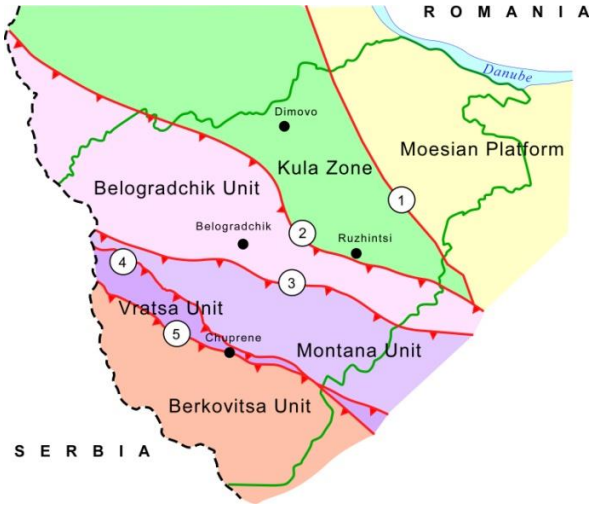


Fig. 4. Tectonic units and major faults: 1 – Peri-Carpathian thrust; 2 – Fore-Balkan fault; 3 – Vedernik thrust; 4 – Vratsa thrust; 5 – Plakalnitsa thrust

West Balkan zone is represented by Berkovitsa and Vratsa units, separated by Plakalnitsa thrust. The southern boundary of the zone is outside the area. Northwest boundary with Fore Balkan is the Vratsa thrust. West Balkan zone is composed of Neoproterozoic high-grade and Cambrian low-grade metamorphic rocks, covered by Late Paleozoic terrigenous deposits.

The Berkovitsa unit builds the southern part of the West Balkan zone. The oldest rocks of the unit are the rocks of the ophiolitic Chernivrah metabasic complex (Neoproterozoic) composed of three metamorphic units: Kopilovtsi metagabbro and ultrabasites, Monastir metabasites and Ruptsi pillow lavas (Haydutov, 1984; Angelov et al., 2006b). The younger Berkovitsa low-grade metamorphic complex (Cambrian) is composed of chlorite-sericite and quartz-sericite schist, diabase, keratophyre, gabbro, marble, meta-sandstones and tuffs (Haydoutov et al., 1979; Angelov et al., 2006a). Stakevtsi massiv (Cambrian) (Ivanov, Haydoutov, 1964) is composed of biotite and amphibole gneiss, granite-gneiss, gneiss-schist, muscovite-chlorite and granate schist, amphibolites, leucocratic granite and granodiorite. The youngest rocks in Berkovitsa unit are Carboniferous and Permian continental terrigenous deposits: conglomerates, sandstones, siltstones, argillites and coal shales of Stakevtsi, Levishte, Milina, Midzhur and Rikovtsi Formations (Tenchov, Yanev, 1963, Yanev, Tenchov, 1972, 1976). The Vratsa unit is a restricted narrow strip between Plakalnitsa and Vratsa thrusts, northeast of Berkovitsa unit. It is composed of low-grade metamorphic rocks of the Berkovitsa low-grade metamorphic complex (Cambrian): chlorite-sericite and quartz-sericite schist, diabase, meta-sandstones and tuffs, covered by terrigenous continental Carboniferous and Permian deposits of Stakevtsi, Levish, Starchovdol and Vran Formations.

West Fore-Balkan zone includes Montana and Belogradchik units separated by the Vedernik thrust. The Montana unit is restricted between Vratsa thrust from SW and Vedernik thrust from NE. Its pre-Mesozoic basis is represented by the Sredogriv metamorphites (Ordovician-Silurian): metamorphosed sandstones, siltstones and conglomerates with olistoliths of basic and acidic igneous rocks. They are covered by Lower Permian terrigenous complex composed of continental conglomerates, breccia-conglomerates, gravelites, sandstones and siltstones with andesite and dacite tuffs, lavas and breccias. Mesozoic sedimentary cover is represented by Lower Triassic sandstones, Jurassic terrigenous-carbonate deposits and thick Middle Jurassic – Lower Cretaceous carbonate complex. The Belogradchik unit occupies the outer zone of the Fore-Balkan. It is composed of more variegated rocks of different ages and types. Pre-Mesozoic basement of the unit is composed of Devonian, Carboniferous and Permian sedimentary, igneous and volcanic rocks. Devonian is represented by two units – Struindol diabase and Shashka siltstone (Angelov et al., 2006a). Carboniferous rocks are of different origin. The igneous rocks are united in Belogradchik Pluton (Upper Carboniferous) composed of granite, plagiogranite, porphyry granite, granodiorite and diorite. The Upper Carboniferous Rayanovtsi Formation is composed of different sedimentary and volcanic rocks: conglomerates, gravelites, sandstones, siltstones, shales, basalt and andesite-basalt lavas and breccias with thin tuff interbeds. Permian is represented by diorite and granodiorite porphyry dikes, plagiogranite and dacite porphyry. Triassic is composed of red Buntsandstein sandstones and conglomerates (Belogradchik and Slivovnik Formations) forming the famous Belogradchik rocks, covered by sandy, biogenic and nodular limestones and dolomites (Kaluger, Edivetar, Babino and Toshkovdol Formations) (Tronkov, 1981; Tronkov, Snnyovsky, 2014). Jurassic sediments overlying transgressively the Triassic carbonates, are the sandstones and gravelites of the Kichera Formation (Middle Jurassic) (Stefanov, Tzankov, 1970; Tchoumatchenko, 1978). This unit is represented by four

official members with type sections in the area: Venets, Kreshtenitsa, Granitovo and Oreshets, whose rocks were used as building stones for the medieval Belogradchik fortress and the medieval mosque in Belogradchik town. They are covered by sandstones, marls, zoogenic and silty limestones (Bov and Polaten Formations) and thick limestones of the West Balkan Carbonate Group (Middle Jurassic – Lower Cretaceous) including the famous "ammonitico rosso" facies. The youngest rocks of the unit are the clayey limestones and marls of the Salash Formation (Berriasian-Barremian) cropping out in the limbs of the Belogradchik anticline.

Kula zone is composed of Cretaceous and Palleogene sediments. The building lithostratigraphic units are: Rabisha Formation (Albian-Cenomanian) – marls and limestones, Kula Formation (Turonian-Maastrichtian) - turbidites, Kladorub Formation (Campanian-Paleocene) - siltstones and marls, Ruzhintsi Formation (Campanian-Paleocene) – sandstones, conglomerates and breccias (Tzankov, 1972; Sinnyovsky, 2013b, 2015). Single section of the so called "couche-rouge" facies of the Mediterranean type Upper Cretaceous is discovered near Ruzhintsi village: Mirkovo Formation (Coniacian-Santonian) – motley limestones and marls and bituminous shale of the Krasava Member of Zavala Formation (Campanian) (Sinnyovsky, 2013a,b; 2015). The outcrops of these rocks are very restricted, because they are almost entirely covered by Neogene and Quaternary deposits. One of the most important geotopes in this zone is the iridium layer at the K/T boundary in Kladorub Formation near Kladorub village (Sinnyovsky et al., 2002; Sinnyovsky, 2003,2004). Another important geotope is the Lower/Upper Cretaceous boundary in Rabisha Formation at Rabisha Mound, with proved thermal maximum on the basis of nannofossil and palynological evidence (Sinnyovsky, Pavlishina, 2014).

Moesian platform is covered entirely by Neogene and Quaternary deposits. Neogene rocks are represented by several lithostratigraphis units: Opanets Formation (Langhian - Lower Serravalian) – marls and clays with shelly limestones, Dimovo Formation (Upper Wolinian – Lower Bessarabian) – sands and sandstones with clays and limestones, Krivodol Formation (Upper Bessarabian) – clays with sandy conglomerate and limestone interbeds, coal shale and lignite coal, Furen Formation (Upper Bessarabian) – limestones with intercalations of sandstones, sands and clays, Smirnenski Formation (Upper Tortonian - Messinian) – alternation of clays, sands, sandy clays and marls, Archar Formation (Upper Messinian) – quartz sands, Brusartsi Formation (Levantian-Piacenzian) – sandy clays, sands and lignite coal (Kojoumdzieva, Popov, 1988). Quaternary is represented by Eopleistocene, Pleistocene and Holocene deposits. Eopleistocene is composed of fluvial-proluvial deposits, covering the Neogene rocks and cropping out at 90-100 m above the river beds. Pleistocene is represented by aeolian-fluvial, aeolian and aeolian-fluvial-deluvial deposits. Most interesting of these modern deposits are the aeolian clays called "loess". They are deposited in aeolian way by the wind in periglacial environment in drying condition of the glacial deposits in the flooding planes of the glaciers.

As can be seen from the above-described brief geological situation Geopark Belogradchik rocks has an exceptional geodiversity. By this criterion it has no analogue in the European Geoparks Network. Here are encountered nearly all varieties of igneous, sedimentary and metamorphic rocks ranging from Proterozoic to Quaternary. During the elaboration of the application dossier for membership in the Global Geoparks Network scientific description of 72 geosites was made: 24 of aesthetic value, 25 of scientific value, 8 geomorphological and karst features, 3 of historical value and 12 non-geological sites (Sinnyovsky, 2014a).

Most of the geosites of aesthetic value are located in the buntsandsten facies on the territory of the natural landmark "Belogradchik Rocks". The list is complemented by extensive karstified fields with picturesque rock arcs and more than 50 caves. The largest one, the Magura Cave, is of aesthetic, scientific, archeological and cultural value. Besides the geological and archeological significance it is of great importance for the local and national vine industry. This is the only place in Bulgaria where naturally sparkling wine "Magura" is produced, aging in one of the branches of the cave.

The geological sites of scientific value are developed on the basis of the remarkable variety of sedimentary, igneous, volcanic and metamorphic rocks. Some of these sites represent geological events of global significance like, for example, the iridium layer at the Cretaceous/Tertiary boundary. Other sites of continental value are outcrops of well known and widely spread in Europe facies like buntsandstein, ammonitico rosso and couche-rouge. Buntsandstein, the indigenous rock of the Belogradchik rocks, is deposited in the German Basin and is of scientific value for the Triassic history of Europe.

Non-geological sites of continental value are also very important part of the concept. The Paleolithic wall paintings in Magura cave are into the indicative list of UNESCO's cultural heritage. Among the sites of archeological value there are numerous Latin strongholds and ruins. In the northern part of the area are preserved ancient ruins of the capital city of Coastal Dacia Province - Ulpia Trayana Ratsiaria. So far the most valuable for the ancient history of the area is the evidence for the first human settlement in Europe recently found by the French-Bulgarian archaeological expedition in Kozarnika Cave.

The geopark concept was disseminated in many publications at different levels: national scientific conferences (Sinnyovsky, 2012a,b,c, 2013a,b, 2014c, 2015) international conferences (Sinnyovsky, 2011; Kalutskova et al. 2012; Kalutskova, Sinnyovsky, 2015), scientific journals (Sinnyovsky et al., 2011; Tronkov, Sinnyovsky, 2005, 2014; Sinnyovsky, Pavlishina, 2014), websites (Sinnyovsky, 2012d, 2014b,c), international magazines (Tronkov, Sinnyovsky, 2012) and monographs (Sinnyovsky, 2013, 2015).

The new concept of Geopark Belogradchik rocks

Belogradchik is an emblematic place not only for the Bulgarian geoconservation, but also for the GEOPARK Initiative of UNESCO. GEOPARKS Programme was first widely publicized at the Belogradchik Workshop of ProGEO'1998 Meeting by UNESCO representatives Patzak and Eder (1998). From this point of view the correct management of the geoheritage is among the major

prerequisites for sustainable development of the Belogradchik area. Maintaining and extension of the tourist facilities will increase the interest to the natural and cultural wonders of the area and will attract more visitors. Geopark initiative gives the area unlimited possibilities to popularize its geological heritage and to develop its tourist potential.

Fig. 5. Administrative map of Vidin District with the new geopark territory (2016): 1 – Geopark area; 2 – State border; 3 – District boundary; 4 – Municipality boundary; 5 – District centre; 6 – Municipality centre

The new geopark territory of 1049 sq. km (fig. 5) fully meets the requirements of the Global Geoparks for well-defined limits and large enough surface area to serve local economic and cultural revival of the area. Thus the new proposed territory, established on the basis of a strong agreement for geopark development and effective management of the area will contribute to the rapid implementation of the UNESCO recommendations and new application for membership in Global Geoparks. Development of more geosites gives opportunity to all settlements of the involved municipalities to take part in regional planning and strategy for regional sustainable socio-economic and cultural development, safeguarding the environment. This is the only chance for the local community to acknowledge and restore its remarkable natural and cultural heritage in a way that will enable the next generation to be proud of it.

From this point of view the refusal of Chuprene and Ruzhintsi municipalities to take place in this regional initiative is rather surprising and inexplicable. This unexpected act put to the test initiative for geopark development in the most underdeveloped region in Bulgaria and Europe. The application for membership in Global Geoparks showed also the sincere disengagement of the central state institutions to this process.

The withdrawal of Chuprene and Ruzhintsi municipalities from ADNW and the refused support from the central institutions compromised the application of the designated area and predestined the failure of the UNESCO mission in 2015. These events disappointed the promoters of the geopark initiative and local stakeholders. However, the Municipality of Belogradchik has an extensive experience (more than century) in management and maintenance of natural and cultural heritage and great potential in the local development. It is involved in the environmental protection by municipality programmes on environment, waste management and air quality. The municipality has an experience in conservation of natural and cultural heritage maintaining natural and historical museums, historical and archeological sites, astronomical observatory and tourist infrastructure (ecotrails, geotrails, velotrails).

This great potential predetermines establishment of new concept for Geopark Belogradchik rocks involving new actors and initiatives. The participation of the municipality in National operational programs and EU co-financed projects (cross-border cooperation Bulgaria-Serbia and Bulgaria-Romania) as project partner and lead partner is a guarantee for the future geopark infrastructure development. The involvement of the third member of the ADNW - Makresh municipality, which contributes with its variegated geological structure and beautiful mountain landscape, can largely replace the remarkable landscape of the Chuprene area.

The new concept of the geopark will be developed on a guaranteed involvement of the participating municipalities in the ADNW, state support of the geopark activities, clear geopark funding, management plan for development of the geopark area, sustainable regional development policy strategy and geotourism development, including other alternative forms of tourism – ecotourism, rural tourism and cultural tourism. Taking into account the significant change of the geopark area the list of the geosites will be supplemented by new non-geological geosites (predominantly of cultural value, for example Rakovitsa Monastery) and geosites of scientific value concerning Neoproterozoic, Early Paleozoic, Tertiary and Quaternary stratigraphic units.

Conclusions

Development of Geoparks in Bulgaria is in its crucial stage. At the moment GGN Bureau thinks that Geopark Belogradchik rocks has not yet reached sufficient maturity to be declared a Global Geopark and requires all stakeholders at Belogradchik to work for at least two more years on establishing a strong Global Geopark. This requires new geopark concept that will guarantee a successful application in Global Geoparks. The exceptional geodiversity of sedimentary, igneous, volcanic and metamorphic rocks ranging from Precambrian to Quaternary, and the remarkable historical and cultural heritage of continental value are the necessary basis for geopark's development. However, the previous unsuccessful applications showed that geological and cultural prerequisites are not sufficient for membership in Global Geoparks. The new concept of the geopark will be developed on a strong agreement between the participating actors, state support of the geopark activities, clear geopark funding, new action plan,

sustainable regional development policy strategy and geotourism development, according to the common requirements for conservation, protection and promotion of natural and cultural sites and monuments in areas with significant natural heritage of international importance in the light of the new International Geoscience and Geoparks Programme (IGGP) of UNESCO.

References

Angelov, V., M. Antonov, S. Gerdvikov, I. Klimov, P. Petrov, H. Kiselinov, G. Dobrev, D. Sinnyovsky, S. Pristavova. *Explanatory note of the Geological map of the Republic of Bulgaria at a scale 1:50 000, Map sheel K-34-21-V (Knyazhevats) u K-34-22-A (Belogradchik).* Sofia, MOEW, Bulg. Geol. Survey, 2006a. - 115 pp.

Angelov, V., M. Antonov, S. Gerdvikov, P. Petrov, H. Kiselinov, G. Ajdanlijski, R. Marinova, S. Pristavova. *Explanatory note of the Geological map of the Republic of Bulgaria at a scale 1:50 000, Map sheel K-34-22-V (Gorn Lom).* Sofia, MOEW, Bulg. Geol. Survey, 2006b. - 48 pp.

Guidelines and Criteria for National Geoparks. UNESCO Global Geoparks Network, January 2007; http://www.unesco.org/science/earth/geoparks.shtml. 2007.

Haydutov, I. Composition and structure of the Stara Planina ophiolotic comlex. – *Abstracts, Sci. confer. „Geology and minerals and ores of Northwest Bulgaria", Bulg. geol. soc., Mihaylovgrad, 16*. 1984. (in Bulgarian)

Haydoutov, I., Y. Tenchov, S. Janev. Lithostratigraphic subdivision of the Diabase-Phyllitoid Complex in the Berkovitsa Mountain. – *Geologica Balc., 9,* 3, 1979. - 13-26.

Ivanov, Z., I. Haydoutov. Structure of the Stakevtsi Pluton and its metamorphic mantle. – *Proc. Geol. Inst., 13,* 1964. - 181-214. (in Bulgarian)

Kalutskova N.N., D. Sinnyovsky, N.M. Dronin. An attempt for nomination of the "Belogradchik rocks" area (Bulgaria) for UNESCO Geopark. – Proc. Intern. scientific-practical confererence „Modern state and perspectives for development extremely protected natural areas in Republic of Belarus", 22-24 Sptember 2012, Domzheritsi, Belarus, UDK 712.23:338.48, 2012. - 353-356. (in Russian)

Kalutskova N.N., Sinnyovsky D. Long Experience of Nomination of the Area „Belogradchik Rocks" (Bulgaria) for European Geoparks Network. Moscow, 2015.

Kojumdgieva, E., N. Popov. Lithostratigraphy of the Neogene sediments in Northwest Bulgaria. – *Paleontol., stratigr. and lithol., 25,* 1988. - 3-26. (in Bulgarian)

Patzak, M., W. Eder. "UNESCO GEOPARK" A new Programme – A new UNESCO label. – *Geologica Balc.,* 28, 3-4, 1998. - 33-35.

Sinnyovsky, D. Five protected outcrops of the Cretaceous/Tertiary boundary in Bulgaria. – *Ann. 50 years UMG "St. Ivan Rilski", 46, Part. I, Geol. and geophys*, 2003. - 177-183.

Sinnyovsky, D. Calcareous nannoplankton biostratigraphy of the Carpathian type Upper Cretaceous - Paleocene deposits near Kladorub Village, Vidin District. – *Ann. Univ. of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 47, Part I, Geol. and Geophys.,* 2004. - 139-145.

Sinnyovsky, D. Geopark Belogradchik rocks - priority of the Bulgarian geoconservation. – *Proc. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2011*, Vol. III, 2011. - 389-396.

Sinnyovsky, D. Belogradchik rocks – a remarkable combination of natural, historical, and cultural landmarks. *Ann. UMG „St. Ivan Rilski", 55, Part. I, Geol. and geophys*., 2012a. - 50-55. (in Bulgarian)

Sinnyovsky, D.. Geotourist potential of Sbegovete area in the western part of the Belogradchik rocks. *Ann. UMG „St. Ivan Rilski", 55, Part. I, Geol. and geophys*., 2012b. - 56-60. (in Bulgarian)

Sinnyovsky, D. Wonders of Bulgaria – another step of the Belogradchik rocks at UNESCO. – *Geosciences 2012*, 2012c. - 155-156. (in Bulgarian)

Sinnyovsky, D. The Belogradchik rocks are our trump card for UNESCO. Official site of the campaign for popularization of the Bulgarian cultural-historic heritage „Wanders of Bulgaria", 2012d. http://www.bgchudesa.com/интервюта.html.

Sinnyovsky, D. Outcrops of the Miirkovo and Zavala Formations in NW Bulgaria. - *Geosciences 2013,* 2013a. - 77-78. (in Bulgarian)

Sinnyovsky, D. *Upper Cretaceous Calcareous Nannoplankton Biostratigraphy in Bulgaria.* S., Publ. House "St. Ivan Rilski", 2013b. - 100 pp.

Sinnyovsky D. *Aspiring Geopark Belogradchik Rocks, European Geopark Network*. - Application dossier, 2014a. - 50 pp.

Sinnyovsky D. Geopark Belogradchik Rocks. Website on the webpage of the Univ. of Mining and geology "St. Ivan Rilski", www.mgu.bg/geopark-belogradchishki-skali/. 2014b.

Sinnyovsky, D. Geosites of Bulgaria: Facebook page of the European Association for the Conservation of the Geological Heritage ProGEO. www.facebook.com/progeo.geoheritage/photos_stream. 2014c.

Sinnyovsky, D. Management and protection of the geodiversity. - *Geosciences 2014*, 2014d. - 117-118.

Sinnyovsky, D. *Upper Cretaceous Calcareous Nannoplankton Biostratigraphy in Bulgaria.* LAP Lambert Academic publishing, Saarbrücken/Germany, 2015. - 142 pp.

Sinnyovsky, D., B. Valchev, D. Sinnyovska. Cretaceous/Tertiary boundary in the Carpathian type Upper Cretaceous near the village of Kladorub, Vidin District. - *Ann. Univ. of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 45, Part I - Geol*., 2002. - 1-5.

Sinnyovsky, D., I. Vasileva, R. Ivanov, I. Vutev. Pine stone – the most impressive monolith in the Belogradchik rocks. - *Ann. Univ. of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 54, Part. I, Geol. and Geophys*., 2011. - 62-66.

Sinnyovsky, D., P. Pavlishina. Nannoplankton and palynological evidence for the Albian-Cenomanian boundary in Northwest Bulgaria. - *C. R. Acad. Bulg. Sci., 67,* 4, 2014. - 551-556.

Statutes of the International Geoscience and Geoparks Programme. - *UNESCO General Conference – 38 Session, Paris, 3-18 November*. 2015.

Stefanov, Y., Tz. V. Tzankov. About the lithostratigraphy of the Lower and Middle Jurassic marine rocks in Belogradchik area. – *Proc. Geol. Inst., Ser. strat. and lithol., 19,* 1970. - 41-59. (in Bulgarian)

Tchoumatchenko, P. On some issues of the lithostratigraphy of the Middle Jurassic in part of the Northwest Bulgaria. –

Ann. Sofia Univ., Geol.-geogr. fac., book. 1 – Geol., 69, 1978. - 171-192. (in Bulgarian)

Tenchov, Y., S. Yanev. Stratigraphy and lithology of the Upper Stephanian and Permian near Belogradchik and Kiryaevi (Northwest Bulgaria). - *Proc. Geol. Bulgaria, Ser. stratigr. and tect., 5,* 1963. - 69-98 (in Bulgarian)

Tronkov, D. Principles of the Triassic stratigraphy in the Belogradchik anticlinorium (Northwest Bulgaria). – *Proc. Geol. Inst., Ser. stratigr. and lithol., 22,* 1973. - 73-98. (in Bulgarian)

Tronkov, D., D. Sinnyovsky. Belogradchik rocks, Belogradchik town. – *Rev. Geology and mineral resources, 12*, 10, 2005. - 23-27.

Tronkov, D., D. Sinnyovsky. Belogradchik rocks in Bulgaria – geological setting, genesis and geoconservation value. – *Springer, Geoheritage, 4,* 3, 2012. - 153-164.

Tronkov, D., D. Sinnyovsky. New data about stratigraphy of the Lower and part of the Middle Triassic in part of the Belogradchik area, Northwest Bulgaria. – *Rev. Bulg. geol.. soc., 75,* 1-3, 2014. - 31-46. (in Bulgarian)

Tzankov, Tz. Jungalpidische Deformationen im Krajna-Gebiet (Nordwestbulgarien). – *Geologie, 21,* 1, 1972. - 24–60.

Yanev, S., Y. Tenchov. Stratigraphy, lithology and structure of the Stephanian-Permian rocks near Stakevtsi village, Vidin District. – *Bull. Geol. Inst., Ser. stratigr. and lithol., 21,* 1972. - 19-39. (in Bulgarian)

Yanev, S., Y. Tenchov. Lithology and stratigraphy of the Late Paleozoic sediments between Lom and Chuprene rivers. – *Paleontol., stratigr. and lithol., 5,* 1976. - 51-78. (in Bulgarian)

The article is reviewed by Assoc. Prof. Dr. Ivan Dimitrov and recommended for publication by the Department "Geology and Geoinformatics".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

МОДЕЛИРАНЕ НА МОСТОВИ СЪОРЪЖЕНИЯ И ХИДРАВЛИЧНИ АНАЛИЗИ С HEC-RAS В ТУНДЖАНСКОТО СТРУКТУРНО ПОНИЖЕНИЕ, В РАЙОНА НА ГР. ЕЛХОВО

Красимира Кършева

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, kkursheva@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Мостовите съоръжения представляват главно звено на пътната инфраструктура. В условията на глобално затопляне и климатични промени, падналите екстремни количества валежи заплашват тези съоръжения с повреди. Най-честата причина за разрушаването на мостови съоръжения е явлението на подмиване на речния материал във фундаментите на мостовите устои. С цел да бъдат избегнати евентуални щети върху пътната инфраструктура, трябва да бъдат взети адекватни и навременни мерки за оценка и предвиждане на подобни евентуални негативни събития. В настоящото изследване е използван еднодименсионалният модул за установен поток на HEC-RAS, за моделиране събитието на подмиване при мостовите устои на моста в гр. Елхово, свързващ града със с. Изгрев. Основните параметри, влияещи върху изчисляването дълбочината на подмиване, са скорост и дълбочина на водния поток, характеристика на седиментния материал в речното корито и дебелината на мостовите устои. Целта на това изследване е прогнозиране, оценка и анализ на потенциални бъдещи събития на подмиване на мостовите основи, в резултат от въздействието на стихийно наводнение в изследвания участък и определяне на местоположението на най-уязвимите зони при основите на мостовото съоръжение.

***Ключови думи*:** ГИС, HEC-RAS, хидравличен анализ.

BRIDGE MODELING AND HYDRAULIC ANALYSIS WITH HEC-RAS AT THE TUNDZHA STRUCTURAL DECLINE, IN ELHOVO TOWN AREA

Krasimira Karsheva
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, kkursheva@gmail.com

ABSTRACT. Bridges are mainunits of the road infrastructure. In terms of global warming and climate change, the fallen extreme rainfall threaten these facilities with damage. The most common cause of bridge failure is the phenomenon of pier scour at bridge foundations. In order to avoid possible damage to road infrastructure, should be taken adequate and timely measures to assess and anticipate such potential adverse events. This study used a one dimensional steady flow HEC-RAS analyses, for modeling pier scour and abutments scour of the bridge in Elhovo town. The bridge connects Elhovo town and Izgrev village. The main parameters affecting scour depth are water speed and water depth of the flow, bed sediment characteristic, and pier width. The aim of this study is forecasting, assessment and analysis of potential future scour events at the bridge foundations as a result of the impact of flash floods in the research area and determine the location of the most vulnerable areas in the foundations of the bridge facility.

***Key words*:** GIS, HEC-RAS, hydraulic analysis.

Въведение

Мостовите съоръжения представляват главно звено на пътната инфраструктура. В условията на глобално затопляне и климатични промени, падналите екстремни количества валежи заплашват тези съоръжения с повреди. С цел да бъдат избегнати евентуални щети върху пътната инфраструктура, трябва да бъдат взети адекватни и навременни мерки за оценка и предвиждане на подобни евентуални негативни събития.

Подмиването на стълбовете и устоите на мостовите съоръжения е явление, причинено от ерозийното действие на протичащия поток в речните легла. Разрушаването на мостовете, дължащо се на изравяне на техните фундаменти, е често срещано явление. Точността на предвиждане на дълбочината на изравяне е от съществено значение за безопасното проектиране и експлоатация на съоръжението. За анализите върху оттока на реката, представляващи еднодименсионални хидравлични изчисления в системата на речните анализи, е използван HEC-RAS софтуер, разработен от Корпуса на инженерите от американската армия (U.S. Army Corps of Engineers, 2010). Софтуерът предоставя възможност за представяне на различни изчисления върху отточните характеристики.

В това изследване модулът на HEC-RAS за моделиране на едномерен установен поток, е използван за моделиране на повърхностните профили, вида на оттока, дълбочината на водния стълб, скоростта на водата, конструкцията на моста във връзка с оценката и анализа на потенциални бъдещи събития на подмиване на мостовите основи. Наблюдавайки метеорологичните прогнози и редицата стихийни наводнения през последните години в България и по света, това моделиране е изключително важно и актуално.

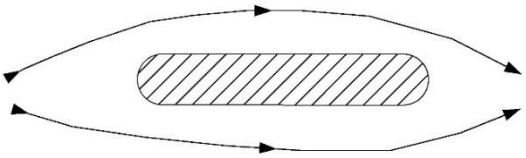
Изследвана територия и детайли за моста в гр. Елхово

Обект на настоящото изследване е участъкът от коритото на р. Тунджа при гр. Елхово (фиг. 1) и преминаващият през реката мост, намиращ се в югозападната част на града и свързващ гр. Елхово със с. Изгрев.

Съществуващото съоръжение над река Тунджа (фиг. 2), представлява пътен мост, разположен над водно препятствие, предназначен основно за движение на автомобили и други пътни превозни средства (селскостопански, строителни машини и др.) (Иванчев, 2005). Мостът е масивен, изграден от зидани устои (фиг. 3) и стоманобетонна конструкция, спадащ по класификация, по своята изчислителна схема към гредовите мостове. Мостът е дълъг приблизително 117 m и е изграден върху 4 зидани устои.

Фиг. 1. Местоположение на изследваната територия

Фиг. 2. Изглед към мостовото съоръжение



Фиг. 3. Форма на мостовите устои в план (по Иванчев, 2005)

Моделиране на мостовото съоржение в гр. Елхово

За създаване на геометричните данни (централната линия на течението - талвегова линия, моделиране на главния канал, напречните профили през коритото на реката, мостовото съоръжение и др.) е използван набор от процедури и инструменти на HEC-geoRAS, разширение към ArcGIS. Данните за надморските височини и километрирането на всички геометрични обекти (напречни профили, речно корито, брегове, мост) се прибавят към атрибутните данни, чрез автоматично извличане от цифровия модел на терена (ЦМТ).

След създаването на необходимите данни за хидравличното моделиране, към приложението HEC-RAS, от ArcGIS се експортират т. нар. RAS слоеве, включващи данни за дебит, коефициент на Манинг, наклон на речното легло. След това се стартира моделът, за да се изчисли обхватът на заливането, като се приемат стабилни и неизменящи се във времето характеристики на водния отток.

Използвани данни при моделирането

Пространствените данни за разработването на еднодименсионалния хидравличен модел при установен поток, очертаващ обхвата на потенциално наводнение, скорост на водата и дълбочина, както и геометрията на мостовото съоръжение, са получени от различни източници. Данните за надморските височини, използвани за генериране на цифровия модел на терена на изучаваната територия, са получени чрез дигитализация на ЕТК в М1:5000. Информацията за земното покритие и земеползването в района, както и определянето на коефициента на триене на различните земни единици (коефициент на Манинг), е по данни от проект „КОРИНЕ /CORINE/ земно покритие 2012“, публикувани на сайта на Изпълнителната агенция по околна среда (ИАОС). На терена, с GPS-приемник, са отбелязани местоположенията на потенциално уязвими от наводнение зони по течението на реката от гр. Ямбол до гр. Елхово. За хидравличното моделиране са използвани данни от хидроложката станция на НИМХ-БАН при гр. Елхово, данни публикувани на сайта на института, както и статистически данни за периода 1961-2004г. от Плана за управление на водите 2010-2015г. на Басейнова дирекция за управление на водите, Източнобеломорски район - Пловдив.

Местоположение на напречните профили през коритото на р. Тунджа

Напречните профили, създадени с HEC-geoRAS инструмента за ArcGIS, са поставени на характерни места по протежението на речния поток (фиг. 4). Създадени са 58 напречни профила, които представят геометрията на водния поток, на приблизително еднакво разстояние един от друг, равняващо се на около 150 m. В близост до моста, разстоянието между напречните профили е сгъстено, за да се фиксират с по-голяма точност бързо променящите се отточни характеристики. Във всеки напречен профил се дефинират ляв и десен бряг, централна линия на оттока, инженерни съоръжения и др. Като основа за изчертаване на напречните профили е използвана ортофотоснимка на

изследвания участък.

Фиг. 4. Местоположение на напречните профили през р. Тунджа и мостовото съоръжение в план

Дефиниране на неефективни отточни области и блокиращи водния поток препятствия

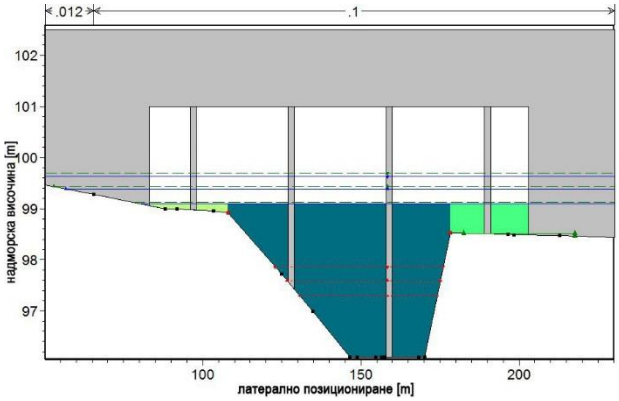
Основният проблем при определянето на данните на моста, е определянето на неефективните отточни области и блокиращи водния поток препятствия (напр. сгради) близо до структурата на моста. Неефективните отточни области и блокиращи обструкции са използвани за определяне и представяне на влиянието, което упражняват тези структури върху симулационния модел на наводнението. Неефективните отточни области представят зони в речното легло, в които скоростта на речния поток е много ниска или равна на нула. На фигури 5 и 6, са представени дефинираните неефективни оточни области и обструкции в обхвата на речното легло.

Фиг. 5. Дефиниране на неефективни отточни области (щрихованите полета)

Хидравлични изчисления през моста

След като е създадена речната геометрия, следващата стъпка е да се определят отточните стойности, режимът на потока и граничните условия за извършване на хидравличните изчисления (фиг. 8 и 9). Скоростта и дълбочината на водния поток (фиг. 7) са изчислени чрез еднодименсионален хидравличен HEC-RAS модел при три вариации на максимални отточни условия: 112, 168, 224 m^3/s. Тези стойности на оттока са прогнозни и представляват 2, 3 и 4 пъти по-голяма стойност от досегашната най-голяма стойност на оттока, измерена през последните 10 години в хидроложката станция на НИМХ-БАН при гр. Елхово. Данните за оттока са модифицирани и служат само за нуждите на това изследване.

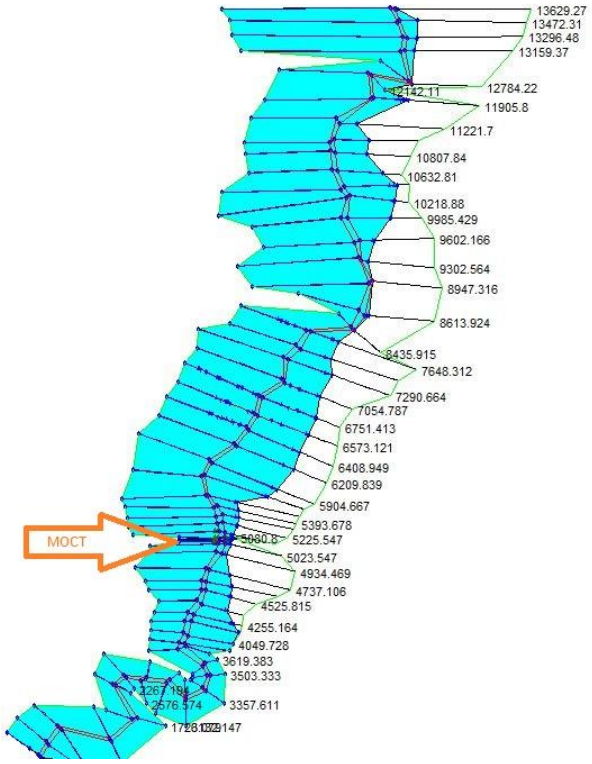
Фиг. 6. Определяне на местоположението на препятствия за водния поток (запълнените с черен цвят полигони)



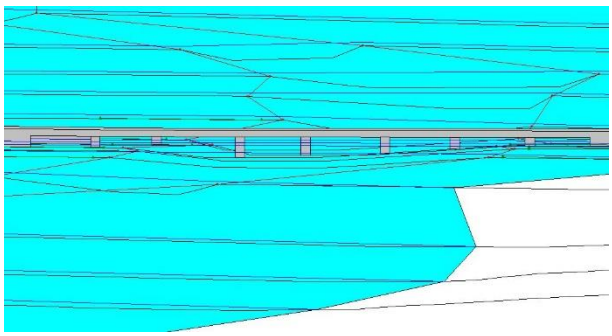
Фиг. 7. Водни нива при повтаряемост 1 път на 10, 20 и 50 г. (с пунктир) и разпределение на водната скорост (с цвят) в напречния профил при мостовото съоръжение на изхода на гр. Елхово

Изчисления при ниски води. В настоящото изследване са използвани изчисленията при ниски води, които се прилагат, когато потокът през мостовия отвор е разположен в открити речни легла и най-високата точка от повърхността на речния поток лежи под най-високата точка от хордата на светлия отвор. За изчисленията при субкритични води, софтуерът използва уравнението за динамика, за да идентифицира категорията на потока.

Това се осъществява като първо се изчислява динамиката при критична дълбочина през мостовото съоръжение, отгоре и отдолу по речната верига. Краят с по-висока скорост, следователно с по-стеснена част, представлява контролиращият моста напречен профил. Ако и двата напречни профила са идентични, програмата възприема профила от горната страна на течението, за контролиращ (US Army Corps of Engineers, 1996).



Фиг. 8. Геометрия на напречните профили през р. Тунджа и максимален разлив на водния поток при повтаряемост 1 път на 10 г., изглед в HEC-RAS



Фиг. 9. 3D изглед към мостовото съоръжение в гр. Елхово и максималния обхват на водния разлив при повтаряемост 1 път на 10 г., изглед в HEC-RAS

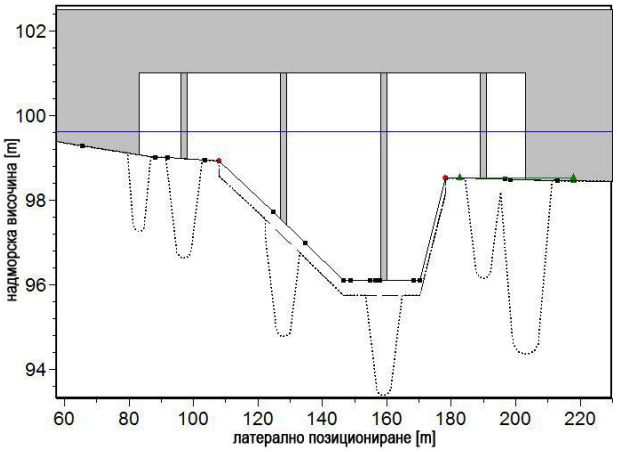
Изчисляване размера на подмиване на основите на мостовото съоръжение в гр. Елхово

При спокойни течения реките отлагат наноси на дъното, а при скорости, надминаващи критичните за даден вид почва, се наблюдава изравяне, известно като общо подмиване. Недобре споените почви устояват на ерозията единствено под действието на теглото си и силите на триене между частиците, които се описват от уравнението на Ван дер Ваалс и се наричат сили на сцепление, или ван-дер-ваалсови сили. Около мостовите устои и стълбове, разположени в речното корито, се получава завихряне на течението, което предизвиква допълнително изравяне, наречено местно подмиване. Върху размера на местното подмиване, освен вида на почвата, скоростта на течението и температурата на водата, голямо влияние има формата на стълбовете в план и ориентацията им спрямо оста на реката.

Събиране на данни и калибриране на модела на подмиване. Факторите, които влияят на дълбочината на местното изравяне са: скорост на потока, непосредствено в горната част на течението преди моста; дълбочината на водния стълб; ширината на устоите; сортировката на материали в речното легло; коефициентът на Манинг за грапавостта на почвата; формата и дължината на опората; геометрията на речното легло, както и ъгълът, под който речният поток атакува основата на моста. В настоящото изследване данните за големината и сортировката на почвените зърна са по Ангелова и др. (1991). За изчисление на подмиването на мостовите устои са използвани съществуващите към момента условия в речното легло. Изравянето му се получава, когато силите в напречно сечение нагоре по течението, са по-големи от праговата стойност на сцепление и също така, когато има движение на почвен материал над наблюдаваното сечение нагоре по течението.

Резултати

Резултатът от направения анализ на устойчивостта на речното легло на ерозивното действие на водния поток потвърждава констатациите, че ъгълът, под който речният поток преминава през основата на моста, е основен фактор, определящ размера на подмиването на мостовите основи и с неговото увеличаване се увеличава и подмиващата сила на водния поток, т.е. колкото по-голям е ъгълът, под който речният поток преминава през основата на моста, толкова по-големи подмиващи сили упражнява той върху мостовите устои.



Фиг. 10. Подмиване на мостовите устои при ъгъл 20˚

При това изследване са изчислени няколко модела на подмиване при мостовите устои, с въведени различни стойности на ъгъла, под който водният поток преминава през основата на моста (0˚, 5˚, 10˚, 15˚, 20˚). На фигура 10 е показан изчисленият модел при стойност на оттока 224 m^3/s и ъгъл на преминаване на водния поток през основата на моста 20˚. Графиката представя дясната греда на моста, като най-уязвимата зона от напречния профил, в която могат да се очакват най-големи поражения, причинени от протичане на стихийни води през мостовото съоръжение. В таблица 1 са дадени крайните резултати от

изследването.

Таблица 1.
Стойности на подмиване при мостовите устои, при отток 224 m³/s

Напречен профил	Ъгъл (градуси)	Показател за режима на транспорт на речния материал	Подмиване при мостовите устои (m)	Подмиване при мостовите стълбове (m)
BR 5064.1456 Bridge	0	0,59	1,7	4,13
	5	0,59	1,66	4,13
	10	0,59	1,92	4,13
	15	0,59	2,15	4,13
	20	0,59	2,36	4,13

Заключение

Географските информационни системи (ГИС) и дистанционните методи са изключително полезни инструменти в изследването на природния риск, и особено наводненията и процесите свързани с тях. Интегрирането на дистанционни данни, полеви изследвания и софтуер (ArcGIS, HEC-RAS) прави възможно определянето на обхвата на потенциално наводнение и допустимите конструктивни ограничения и критерии, при изграждането и експлоатацията на инженерните съоръжения по протежение на речното легло. Основното предимство на използването на ГИС за управление на наводненията е, че позволяват, не само да се генерира и очертае техният обхват, но и да се създаде потенциал за следващи анализи и определяне на размера и магнитуда на щетите, причинени от потенциално наводнение. Мониторингът на местното подмиване на основите на мостовото съоръжение е много важна част от цялостното му управление и експлоатация, за предсказване на бъдещи рискови състояния и избягване на тежки щети или разрушения. От симулираното местно подмиване на мостовите устои, чрез използването на еднодименсионален хидравличен модел на HEC-RAS за установен поток, може да се обобщи, че то се изменя от 1,37 до 2,36 m при мостовите устои, докато подмиването в дясната греда на моста не изменя стойностите си от 4,13 m, при промяна на ъгъла, през който водният поток преминава през моста.

Като цяло резултатите от изследването предлагат по-добро разбиране на ерозивното влияние на водния поток и подмиването при мостовите устои и стълбове.

Литература

Ангелова, Д. Н. Попов, Е. Миков. Стратиграфия на кватернерните седименти в Тунджанското понижение. - *Сп. Бълг. геол. д-во*, *52,* 2, 1991. - 99-105.

Басейнова дирекция за управление на водите Източнобеломорски район - Пловдив. - *План за управление на речните басейни в Източнобеломорски район 2010-2015, Том III Тунджа.* http://earbd.org/indexdetails.php?menu_id=367

Иванчев, И. *Стоманобетонни мостове (лекции)*. 2005. – 138-155. http://www.otvaszavas.eu/Bulgaria/Information/Information-2015/mostove-lekcii.pdf

ArcGIS Resources – Esri, *Inc*. ArcGIS Help Library - http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center – *Bridge hydraulic Analysis with HEC-RAS*. TP 151. 1996. - 26p.

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center – HEC-RAS, River Analysis System Application Guide. V.4.1, 2010. - 351p.

Статията е рецензирана от доц. д-р Борис Вълчев и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и геоинформатика".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, GeologyandGeophysics, 2016

ПЕТРОГРАФИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ НА ВЪГЛИЩА ОТ ПЧЕЛАРОВСКОТО НАХОДИЩЕ, ИЗТОЧНИ РОДОПИ
I ЧАСТ. ПЕТРОГРАФСКА И МИНЕРАЛОЖКА ХАРАКТЕРИСТИКА

Ирена Костова

Софийски университет „Св. Кл. Охридски", Катедра Геология, палеонтология и изкопаеми горива, 1000 София; irenko@gea.uni-sofia.bg

РЕЗЮМЕ. Изследвани са проби от находище Пчеларово. Въглищата са блестящи кафяви, високопепелни и високосерни. Цел на изследването е да се направи детайлна петрографска и минераложка характеристика на въглищата. За целта са извършени технически анализ, определяне на формите на сярата, Rock Eval пиролиза, измерване на отражателната способност на улминита, оптична и електронна микроскопия, снабдена с приставка за микроелементен анализ. Количественият мацерален анализ показва преобладаването на улминит и в по-малка степен на текстинит. От липоидните мацерали се наблюдават споринит, кутинит и резинит, а понякога и алгинит и липтодетринит. Инертинитовите мацерали са представени от фунгинит и по-рядко от семифузинит и инертодетринит. Минералният състав на въглищата е разнообразен. Най-голямо е съдържанието на пирит, кварц и илит. В по-малко количество се установяват каолинит, К фелдшпат, гипс, калцит и сидерит. Определени са и редица акцесорни минерали, чиято концентрация е <1 %. Разнообразният състав и повишеното съдържание на неорганично вещество в изследваните въглища е силно повлияно от активната вулканска и хидротермална дейност, която е протичала едновременно с процесите на торфогенеза и въглефикация, а също и от присъствието на Pb-Zn, Cu и полиметални минерализации в района на находището.

Ключови думи: Пчеларовско въглищно находище, мацерален състав, минерален състав.

PETROGRAPHY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF COAL FROM PCHELAROVO DEPOSIT, THE EASTERN RHODOPES
PART I. PETROGRAPHICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATION

Irena Kostova
Sofia University "St. Kliment Ohridski", Department of Geology, Paleontology and Fossil Fuels, 1000 Sofia; irenko@gea.uni-sofia.bg

ABSTRACT. Samples from Pchelarovo deposit were studied. The coals are subbituminous, with high ash and high sulfur content. The goal of the investigation is to perform detailed petrographical and mineralogical coal characterization. The following methods have been applied – proximate analysis, sulfur forms determinations, Rock Eval pyrolysis, ulminite reflectance measurement, optical and scanning electron microscopy, equipped with an appliance for microelemental analyses. The quantitative maceral analysis reveals that ulminite totally predominates and textinite also presents in smaller amount. Sporinite, cutinite, resinite and sometimes alginate and liptodetrinite were observed from the group of the liptinite macerals. The macerals from inertinite group are present from funginite, and rarely from semifusinite and inertodetrinite. The mineral coal composition shows that pyrite, quartz and illite are the main minerals in studied coals. The kaolinite, K feldspar, gypsum, calcite and siderite are present in lower amount. The numbers of accessory minerals, lower than 1 %,have been also determinated. The variety of mineral composition and the increased content of an inorganic matter in studied coals is strongly influenced by the volcanic and hydrothermal activity,simultaneous with the peat formation and coalification precess, and with the presence of Pb-Zn, Cu and polymetallic mineralizationin in the region of the Pchelarovo deposit.

Keywords: Pchelarovo coal deposit, maceral composition, mineral composition.

Въведение

Първото подробно описание на палеогенските въглища и въглепроявления в Източните Родопи е направено от Минчев и колектив през 60-те години на XX век (Минчев и др., 1964). В публикуваните от тях данни въглищните хоризонти и пластове са разгледани в контекста на конкретната геоложка обстановка на района и е направена стратиграфска подялба на седиментите. Изложено е схващането за съществуването на два въгленосни хоризонта, като въглищата в тях са с различна степен на въглефикация. Представени са данни за условията на въгленатрупване и е направена оценка на перспективността на Пчеларовското находище (Минчев и др., 1964). Съществува оскъдна информация за петрографията на въглищата от Пчеларовското находище. Кратка петрографска и геохимична характе-ристика на въглищата и въглепроявленията в Източните Родопи и изводи за обстановката на отлагането им, направени на базата на определяне на изотопите на сярата има в работата на Gouin et al. (2007).

Цел на настоящото изследване е да се извърши детайлна петрографска и минераложка характеристика на въглищата чрез прилагане на нови и съвременни изследователски методи.

Геоложка характеристика и въгленосност на находището

Пчеларовското находище се намира в Източните Родопи на 20 km северно от гр. Кърджали и заема площ от около 200 km^2. Подробна информация за геологията и въгленосността на басейна има в работите на Минчев и др. (1964) и Йорданов и др. (2008). Стратиграфията на находището се определя от характера на горноео-ценските въгленосни седименти, разположени върху пъстра подложка от протерозойски скали и покрита от пирокластични олигоценски материали. Протерозойската подложка е изградена от кристалинни скали, предимно двуслюдени и мусковитови гнайси и амфиболити и не се разкрива повсеместно. Стратиграфският разрез на въгленосната формация включва шест литоложки хоризонта, включени в две задруги – долна, преобладаващо континентална, и горна предимно морска. Възрастта и на двете задруги е определена като горноеоценска (приабонска).

Стратиграфската подялба на въгленосната формация е направена от Минчев и др. (1964) и включва основен моласов хоризонт, първи и втори въгленосен и надвъглищен мергелен хоризонт.*Основният моласов хоризонт* е развит в континентален фациес и включва пясъчници и разнокъсови конгломерати. Седиментите на *първия въгленосен хоризонт* са генетически нееднородни, като в западната и южната част на находището те са продукт на континентална сладководна седиментация, а в източната част на морска и лагунно-морска седиментация. В западната зона са съществували благоприятни условия за въглеобразуване и се формират въглищни пластове, а в източната зона се отлагат битумолити. Между двете зони съществува участък на преходна седиментация, която се характеризира с едновременно съществуване на битумолити и тънки въглищни прослойки. *Междинният моласов хоризонт* е изграден от пясъчници, конгломерати и валунни конгломерати. В неговите рамки съществуват две различни седиментационни зони, като континенталните образувания преобладават. *Вторият въгленосен хоризонт* има хетерогенен състав като разпространението на двете седиментационни зони е съществено изменено. Зоната с морска седиментация заема по-малка площ в източната част, но се разпростира нашироко в южната част на басейна. В западната и централна част на находището се формират въглищни пластове, на изток – мергели и пясъчници, а на юг – предимно варовици. По време на формиране на *надвъглищния мергелен хоризонт* двете седиментационни зони се ликвидират и материалите са почти изцяло изграден от монолитни морски седименти. Над него се разполагат седиментите на *флишоподобния хоризонт* изграден от грубокластичен и блоков материал, примесен с туфи, което свидетелства за начало на ефузивна дейност в съседен на находището район още преди началото на олигоцена. *Покривката на въгленосната формация* е изградена от наслаги с олигоценска възраст, които се разполагат върху еоценските седименти. Представена е от андезитови и латитови туфобрекчи, туфи, туфити, андезити, латити и по-рядко от варовици, което бележи началото на интензивна вулканска дейност (Йорданов и др., 2008).

Въгленосността на находището се определя от континенталната задруга на приабона, като въглищните пластове и от двата хоризонта са включени в сладководните седименти. Във всеки въгленосен хоризонт са включени по три сложно развити въглищни пласта, като сумарната им дебелина е около 10 m. Дебелината на първия въгленосен хоризонт е 10-15 m в най-западната част на находището, а на изток достига 60-80 m. В него се установяват три въглищни пласта, които бързо променят дебелината и строежа си. Въглищата са определени като черни, газови (Минчев и др., 1964). Вторият въгленосен хоризонт, най-добре развит в района на с. Пчеларово, заема горните нива на континенталната седиментна задруга и също съдържа три въглищни пласта, от които първите два имат сложен строеж. Дебелината на въгленосния хоризонтът е непостоянна и се изменя от 10-15 до 50-60 m в различните части на басейна. Тук въглищата имат по-ниска степен на въглефикация от тези от първия хоризонт и са определени като кафяви блестящи (Минчев и др., 1964).

Методика на изследване

Опробвани са въглищните пластове от втори въгленосен хоризонт на находище Пчеларово, като са взети три въглищни проби от разкрития, разположени южно от с. Пчеларово. Извършени са комплексни петрографски и минераложки изследвания, които включват определяне на пепелното съдържание,, формите на сярата, отражателна способност на улминита, оптична микроскопия, рентгенодифракционен анализ (XRD), сканираща електронна микроскопия, снабдена с приставка за микросондов елементен анализ. .

Техническият анализ и формите на сярата са определени в лабораторията на Софийския университет, като за целта е приложена стандартна методика и съответните ISO стандарти. Измерването на отражателната способност на улминита е извършено в Университета в Льобен, Австрия, като са използвани апарати Rock Eval 6 и Leco. Количественият мацерален анализ е направен на микроскоп Leica DM 2 500 POL, в отразена и флуорисцентна светлина, при използване на маслена имерсия и обектив с увеличение x50.

Рентгенодифракционните измервания са осъществени на апарат Philips PW 3710. За диагностика, определяне на морфологията и химичният състав на минералите във въглищата е използван сканиращ електронен микроскоп, снабден със сонда за микроелементен анализ (EPMA) – Cameca SX100 Electron Microprobe с два вида детектори: 5 wavelength dispersive X-ray (WDX) и Bruker AX 4010 X Flash silicon draft energy dispersive X-ray (EDX) детектори. И в двата случая образците предварително са покрити с въглерод. Всички минераложки изследвания са осъществени в департамента по минералогия на Музея по естествена история в Лондон.

Резултати и дискусия

Обща характеристика и съдържание на сяра

Данните от основната характеристика на въглища е представена в Таблица 1. Измерена е отражателната способност на улминита. Резултатите от изследването показват, че въглищата от втори хоризонт са с високо съдържание на обща сяра, а стойностите на отражателната способност на улминита показва, че по степен на въглефикация въглищата са кафяви блестяши.

Високото съдържание на сяра във въглищата от находище Пчеларово се обяснява с характера на палеосредата, в която се е осъществявало торфонатрупването, а впоследствие и въглефикацията. Факторите, които контролират постъпването на сяра в торфеното блато, свързването й под формата на органични и неорганични съединения и увеличаване на съдържанието й по време и след въглефикационните процеси са дискутирани многократно (Casagrande, 1987; Костова, 2005; Chou, 2012 и др.). От съществено значение е постъпването на морски води в торфеното блато, а също и след консолидацията на торфения пласт, по време на диагенетичните промени на въглищното вещество. Морските води са богати на сулфати, които веднъж постъпили в торфището започват да се редуцират от бактериите и образуват H_2S, полисулфиди и елементна S. Реакцията между H_2S и FeO води да образуване на микроскопични пиритни кристали и на макинауйт ($FeS_{0.9}$), който от своя страна реагира със S образувайки грейгит (Fe_3S_4), а впоследствие и фрамбоидален пирит. Редуцираните серни съединения взаимодействат с органичната материя и образуват органични сяросъдържащи съединения. По време на диагенезата се формира струпване от пиритни фрамбоиди и евхедрални кристали, разсеяни сред органичното вещество. Всички тези процеси водят до образуване на торф с високо съдържание на сяра, какъвто е и случаят с високосерните въглища от находище Пчеларово. Характерно за подобен тип въглища е високата концентрация на органична сяра, в сравнение със съдържанието на пиритна, факт, който се потвърждава и от настоящото изследване (табл. 1). Образуване на епигенетичен пирит и на други епигенетични сяросъдър-жащи съединения не е установено.

Мацерален състав на въглищата

Данните за петрографския състав на въглищата са представени в Таблица 1. Количественият мацерален анализ показва, че основната част от въглищното вещество е изградено от мацерали от групата на хуминита и от минерални примеси. Неорганичното вещество съставлява около една трета от въглищната матрица, като съдържанието му се изменя от 27,7 до 31,2 % от общата маса.

Най-широко представени в органичното вещество са мацералите от групата на хуминита, които изграждат от 62,3 до 66,4 % от общата маса. Преобладаващо е присъствието на улминит, в по-малка степен на текстинит, докато атринит, денсинит, корпохуминит и гелинит се установяват в редки случаи. Улминитът се среща под формата на ивици, с дължина от 200-300 μm до няколко милиметра и ширина от 20-30 до 50-100 μm и лещи с дължина около 200-300 μm. Той образува тясна асоциация с фрамбоидалния и евхедралния пирит (фиг. 1,а,б,в,д). Текстинитът образува по-малки лещовидни тела с размери 20-30x40-50 μm (фиг. 1,г,д). От мацералите от подгрупата на детрохуминита, по-често срещан е атринитът, който е финнопримесен с неорганично вещество.

Липоидните мацерали включват споринит, кутинит, резинит, алгинит, липтодетринит и хлорофилинит. Споринитът е представен от микро- и макроспоринит, като микроспорите са единични, с размери до 20 μm (фиг. 1,е), а макроспорите са разкъсани и достигат дължина до 100-150 μm (фиг. 1,з). Кутинитът се наблюдава с характерната си издължена и назъбена от едната страна ивичеста форма, като дължината на ивиците достига до 100-200 μm (фиг. 1,ж), а в някои случаи и до 1-2 mm (фиг. 1,б). Резинитът се среща като отделни, най-често закръглени тела с размери 30x40 μm (фиг. 1,е,з), в асоциация с други липоидни мацерали и разпръснати сред детрохуминита. Установени са още алгинит, под формата на единични тела с размери 10-15 μm (фиг. 1,е), хлорофилинит, като микроскопични зърнести маси и в асоциация с кутинит (фиг. 1,ж) и липтодетринит (фиг. 1,е), които особено добре се наблюдават във флуорисцинтна светлина.

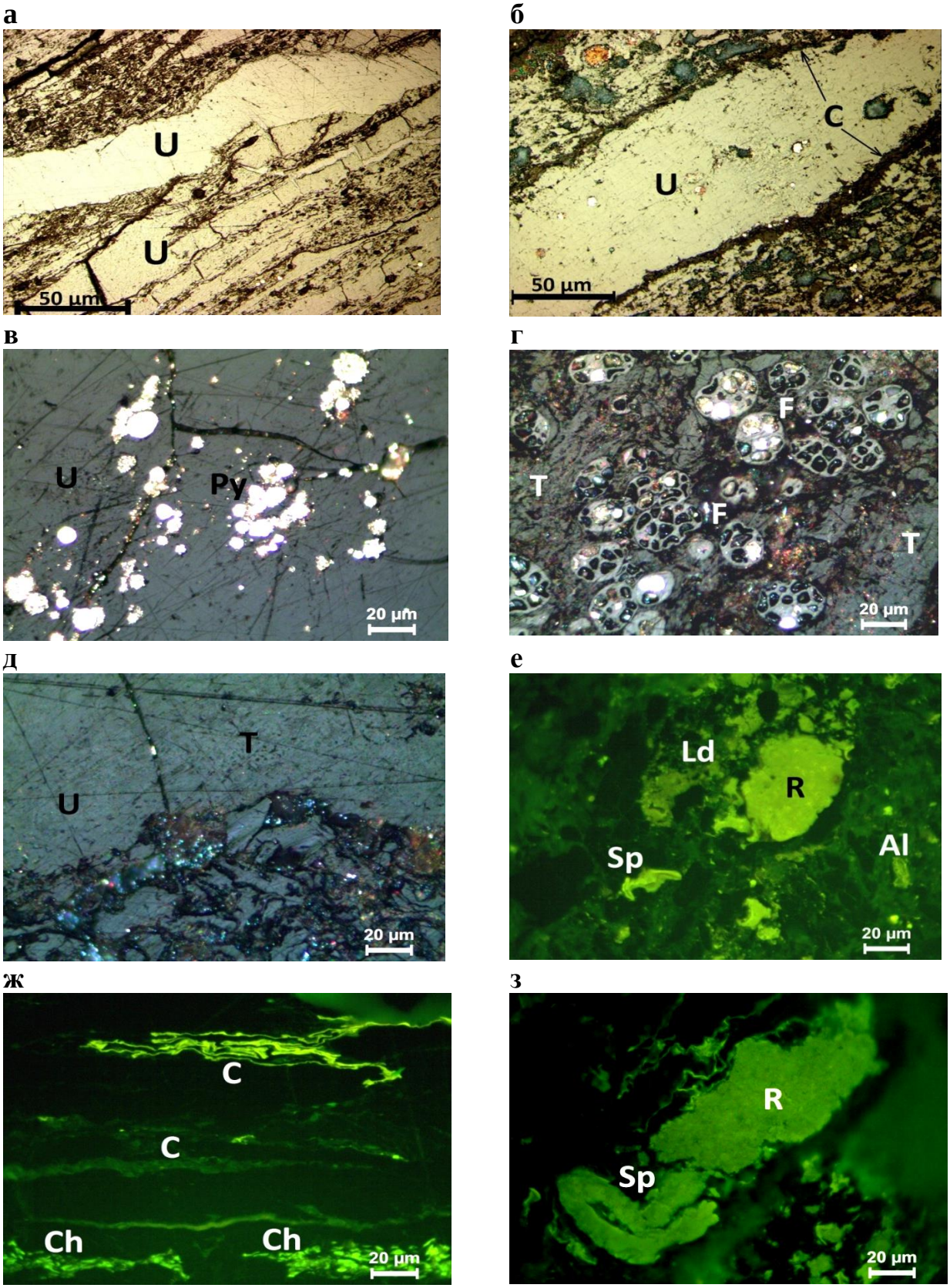
От мацералите от групата на инертинита се установява основно фунгинит и по-рядко семифузинит и инертодетринит. Фунгинитът е цял, с размери от 5-10 до 20-25 μm, по правило е многокамерен, като отделните камерки са празни или запълнени от пирит или други минерални примеси (фиг. 1,г). Срещат се и едно- и двукамерен фунгинит, като най-дребните фунги са разкъсани. Семифузинитът се наблюдава рядко и размерите на телата му варират от 50 до 100-200 μm.

Таблица 1.

Основна характеристика на въглищата от Пчеларовското находище

Проби	Форми на сярата (a), wt%				Пепелно съдър-жание wt %	TOC (%)	Tmax (°C)	HI	Ro (%)	Средно Ro, %	Петрогрофски състав			
	S_t	S_{py}	S_{sulf}	S_{org}							H	L	I	M
1	6,02	1,76	0,59	3,67	39,13	30,38	415	93,15	0,49		65,7	3,8	2,8	27,7
2	5,96	1,65	0,78	3,53	48,17	30,50	420	94,43	0,48	0,48	62,3	4,6	1,9	31,2
3	4.98	1,65	0,35	2,98	45,22	30,42	419	94,67	0,47		66,4	2,9	2,1	28,6

a – на аналитична маса; TOC – общ органичен въглерод; HI – водороден индекс; Ro – отражателна способност на улминита.



Фиг. 1. Петрографски състав на въглищата от Пчеларовското находище. Оптична микроскопия, отразена светлина. а) улминитови (U) ивици и лещи; б) леща от улминит (U) с разпръснат сред нея пирит, а по краищата й кутинит (C); в) улминит (U) и разпръснат сред него фрамбоидален и евхедрален пирит (Py); г) фунгинит, преобладаващо многокамерен (F) сред текстинит (T), като камерите на фунгинита са празни или запълнени с пирит и други минерали; д) текстинит (T) и улминит (U); е) споринит (Sp), резинит (R), алгинит (Al) и липтодетринит (Ld) (флуорисцентна светлина); ж) кутинит (C) и хлорофилинит (Ch) (флуорисцентна светлина); з) макроспоринит (Sp) и резинит (R) (флуорисцентна светлина).

Минерален състав на въглищата

Във въглищата от пчеларовското находище се установяват редица сулфидни, сулфатни, силикатни, карбонатни, фосфатни, оксидни и хидрооксидни минерали и други неорганични фази.

Резултатите показват, че главни (> 3 %) и второстепенни (1-3 %) минерали са пирит, кварц, каолинит, илит, К-фелдшпат, гипс, калцит и сидерит, като най-разпрастранени са пирит, кварц и глинестите минерали (каолинит и илит). Групата на акцесорните минерали и фази (< 1 %) включва грейгит, сфалерит, хематит, магнетит, титаномагнетит, гьотит, корунд, рутил, серицит, мусковит, плагиоклаз, циркон, амфибол, ярозит, сомолнокит, барит, манганокалцит, доломит, родохрозит, апатит и вулканско стъкло.

.

Сулфидни минерали

Сулфидите са представени от пирит, грейгит и сфалерит, които се намират в тясна връзка с органичното вещество. Най-голямо е количеството на пирита, който се установява почти повсеместно в разглежданите въглища. Той най-често асоциира с улминита (фиг. 2,а,в,г,е) или другите мацерали от групата на хуминита (фиг. 3,а), но се среща и финно-примесен с глинести минерали, кварц и фелдшпат, а понякога и с калцит (фиг. 2,б,г; фиг. 3,а). Наблюдават се две форми на пирита – евхедрален и фрамбоидален. Евхедралният пирит образува добре остенени кристали с кубична, октаедрична, пентагондодекаедрична или кубоктаед-рична форма и размери от 0.1 до 8-10 μm (фиг. 2,г,д,е,ж, з; фиг. 3,а). Освен това се установяват и закръглени или ъгловати зърна с размери от 1 до 5 μm. Фрамбоидалният пирит е с размери от 4-5 до 15-20 μm, като най-често срещаните фрамбоиди са с големина около 10 μm (фиг. 2,а,б,в,г,д). Всеки фрамбоид е изграден от пиритни кристалчета с размери по-малки от 1 μm и с октаедричен хабитус. Фрамбоидалният и евхедралният пирит често е групиран, като по този начин образува струпвания под формата на лещи и прослойки сред органичното вещество (фиг. 2,а,б,г,д,е,ж,з; фиг. 3,а) или формира поликристални агрегати с глинестите минерали и кварца или с карбонатните минерали (фиг. 2,б,г; фиг. 3,а). Пиритни зърна и микроскопичните кристали често запълват клетъчните отвори на растителните тъкани или други празнини във въглищната матрица (фиг. 2, в).

Грейгитът винаги се установява в тясна асоциация с пирита (фиг. 2,д). Подобна асоциация е генетично обусловена от изказаната от Chou (2012) теория за произхода на Fe-сулфиди и фрамбоидалния пирит в торфените блата, според която по време на ранната диагенеза, в редукционна среда, Fe^{3+} от глините се редуцират до Fe^{2+}, вероятно с помощта на сулфат-редуциращите бактерии, реагира с H_2S, което води до образуване на FeS. Fe-моносулфид взаимодейства с елементната S и образува няколко сулфидни съединения – от макинауйт [$FeS_{0,9}$] през грейгит [Fe_3S_4] до фрамбоидален пирит [FeS_2]. Съществуват четири етапа през които преминава образуването на фрамбоидалния пирит: (1) формиране на Fe-сулфид; (2) реакция, която води до образуване на грейгит; (3) формиране на монокристали на грейгита; (4) заместване на грейгита от пирит (Wilkin and Bernes, 1997). Единичните пиритни кристали се формират при взаимодействие на FeS с полисулфидните съединения, а пиритните фрамбоиди се образуват по-късно в торфеното блато, но преди консолидацията на торфа (Luther, 1991). Сфалерита се среща като отделни кристали с размери 1-2 μm сред улминита.

Характерната форма на присъствие на пирита и другите сулфидни минерали, които се явяват финно-смесени с органичното вещество и по-точно с мацералите от групата на хуминита показва, че те са със сингенетично-диагенетичен произход. Епигенетичен пирит не се наблюдава.

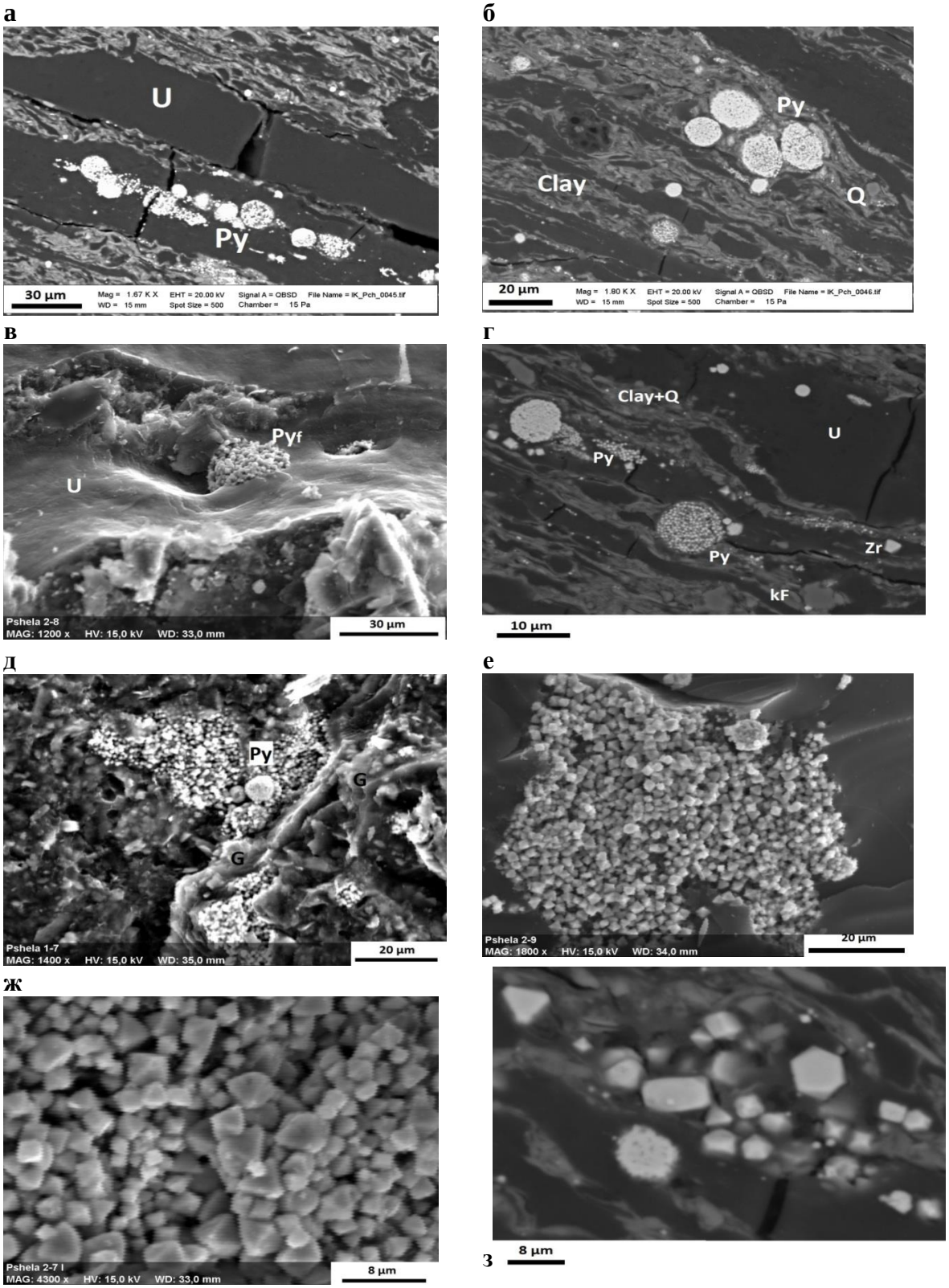
Оксиди и хидрооксиди

Fe-оксиди и хидрооксиди се наблюдават като кори по микропукнатини или покриват въглищното вещество, по повърхности, които са били изложени продължително време на атмосферно влияние (фиг. 3,г). Срещат се още като отделни зърна с размери от 5 до 15 μm (корунд, магнетит, рутил) и призматични кристали с размери около 40 μm (хематит и титаномагнетит), разпръснати сред органичното вещество. Формата им на присъствие в изследваните образци говори за това, че те са продукт от изветрителни процеси или имат детритусен произход и са внесени в торфеното блато от околната провинция, богата на Fe-Zn и Cu-орудявания.

Силикати

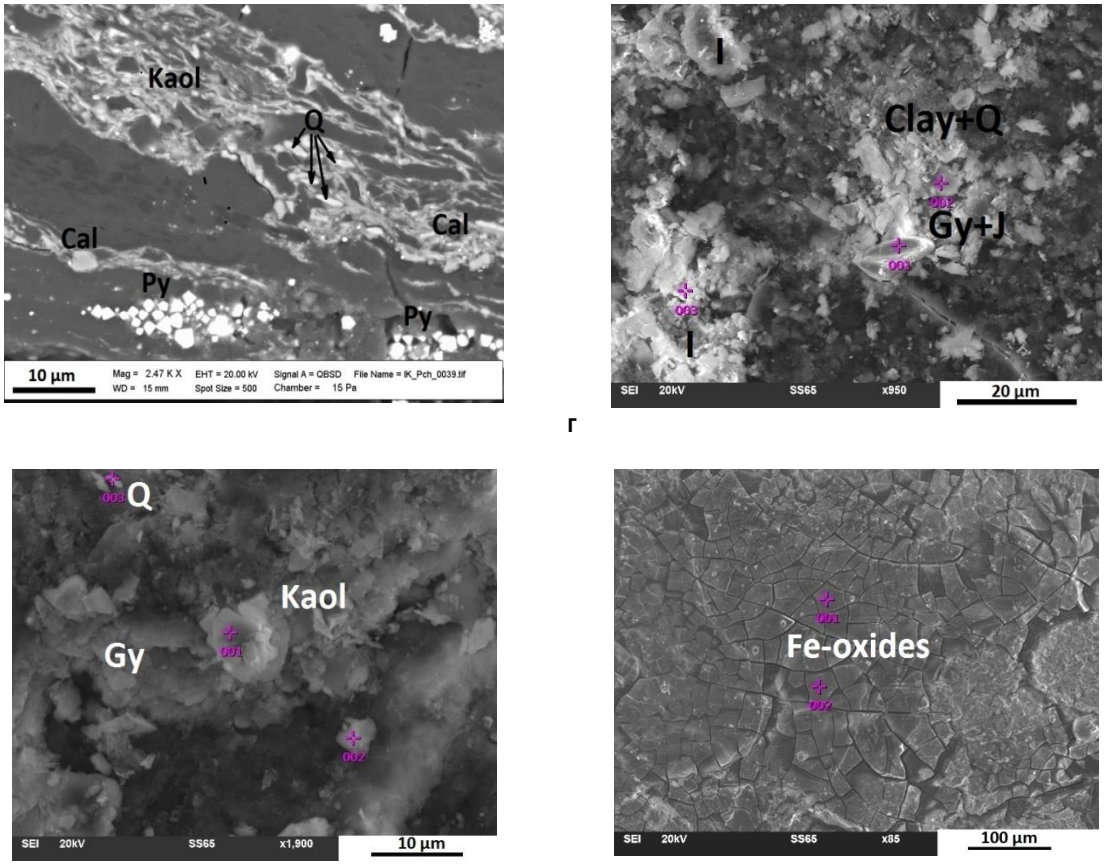
Кварцът, каолинитът, илитът и К-фелдшпат са основните силикатни минерали. Кварцът се наблюдава повсеместно под формата на полузакръглени или ъгловати зърна, разпръснати сред органичното вещество или в състава на полиминерални агрегати, заедно с пирита, глинестите минерали, К-фелдшпат, други силикатни минерали (плагиоклаз, циркон, амфибол) или с калцита и сидерита (фиг. 2,б,г и 4,а,б,в). Размерите на кварцовите зърна варират в широки граници от 1-2 до 50-60 μm. Освен кварц, се установяват още опал и кристобалит. Те имат сфероидална форма и размерите им варират от 1 до 15 μm. За разлика от кварца, чиито произход най-вероятно е детритусен, то произходът на опала и кристобалита е свързан най-вероятно с олигоценската вулканската дейност, която се е извършвала в близост до района на находището. Мусковитът се среща като отделни люспи с размери от 30-40 до 100-150 μm, амфиболът образува призматични кристали с ширина 40-50 μm и дължина до 200-300 μm, а цирконът формира късопризматични кристали с размери от 1 до 5 μm (фиг. 2,г). Предполага се, че произходът на посочените минералите е преобладаващо детритусен. Каолинитът и илитът, които са широко разпространени в разглежданите въглища и за които се предполага автогенен, но и детритусен произход се срещат финно диспергирани сред органичното вещество и/или в състава на поликристални прослойки и лещи сред въглищната матрица. Каолинитът образува псевдохекса-гонални кристални агрегати с размери от 1 до 5 μm (фиг. 3,в), а илитът се среща под формата на отделни люспи или дългопризматични кристали с дължина 1-2 μm, които също образуват своеобразни агрегати (фиг. 3,б). Глинес-тите минерали се наблюдават в тясна връзка с кварц, пирит, К-фелдшпат, гипс, калцит и редица други минерали (фиг. 2,б,г и 3,а,б,в). Плагиоклазът и К-фелдшпати се срещат като отделни зърна (от 1 до 150 μm) или под формата на късо (до 20

μm) или дълго-призматични (до 200 μm) кристали (фиг. 2,г). За тях е характерно, че са силно променени и отчасти заместени от серицит и глинести минерали. Подобна промяна на плагиоклаза и К-фелдшпати е описана от Vassilev et al. (1995) за въглищата от находище Вълче поле. То е разположено в непосредствена близост и е сходно с пчеларовското находище, като авторите отдават промяната на споменатите минерали с магматичния им произход.



Фиг. 2. Минерали във въглища от Пчеларовското находище. Сканираща електронна микроскопия, отразени електрони. а) пиритна леща (Py), съставена предимно от фрамбоидален пирит сред улминит (U); б) асоциация между фрамбоидален пирит (Py), глинести минерали (Clay) и кварц (Q); в) пиритен фрамбоид (Py_f), запълващ клетъчен отвор; г) пиритни фрамбоиди (Py), дребни пиритни кристали, циркон (Zr), К-фелдшпат (kF) и кварцови зърна (Q), разпръснати сред органично и глинесто вещество; д) пирит (Py) и грейгит (G) в тясна асоциация с органично вещество; е) струпване на пиритни кристали сред органично вещество (Py); ж) евхедрални пиритни кристали с октаедрична и куб-октаедрична форма; з) пиритен фрамбоид и добре остенени пиритни кристали с кубична, октаедрична и куб-октаедрична форма сред органично вещество.

а б



в г

Фиг.3. Минерали във въглища от Пчеларовското находище. Сканираща електронна микроскопия. Отразени електрони. а) минерална прослойка, съставена от каолинит (Kaol), кварц (Q) и калцит (Cal) и малки пиритни лещи (Py), разсеяни сред органичното вещество; б) минерални прослойки и лещи, съставени от илит (I) и кварц (Q) в асоциация с гипс (Gy) и ярозит (J); в) струпване от каолинит (Kaol), кварц (Q) и гипс (Gy); г) криптокристална кора от Fe оксиди и хидрооксиди.

Сулфати

Най-често срещаният сулфатен минерал е гипсът, но се установяват още и ярозит, сомолнокит и барит. Гипсът се наблюдава под формата на бели, подобни на пудра агрегати, изградени от късо- и дългопризматични криста-ли с размери съответно 5x10 µm и 1-2x100-150 µm. Ярозитът образува коломорфни кори и радиалнолъчести агрегати изградени от късо- или дъргопризматични крис-тали, достигащи до 100 µm. Сулфатните минерали обикновено се наблюдават под формата на поликрис-тални агрегати, които образуват лещи или запълват микропукнатини във въглищното вещество (фиг. 3,б,в). Счита се, че гипсът и останалите сулфати са продукт от окислението и промяната на сулфидните (най-вече на пирита) и карбонатни минерали, а също и резултат от разлагането на глините. Те могат да имат и епигенетичен произход, в случаите когато се отлагат от хидротермални разтвори.

Карбонати

Карбонатните минерали са представени основно от калцит и сидерит, но се установяват още манганокалцит, доломит и родохрозит. От тях наблюдавани под микроскоп са само калцит, сидерит и доломит. Калцитът и доломитът се установяват като отделни късове и зърна с размери около и под 5 µm, които образуват лещи и прослойки сред органичното вещество или запълват клетъчните отвори на структурните мацерали (фиг. 3,а). Карбонатните минерали, в по-голямата си част, са сингенетични на торфообразу-ването, но е възможно отделни фрагменти да имат детритусен произход и да са внесени в торфеното блато от подхранващата провин-ция. Сидеритът се наблюдава под формата финнозър-нести лещи сред органичното вещество, които очевидно са сингенетични по произход или под формата на сфероидални агрегати с размери около 5-10 µm, които най-вероятно са епигенетични и са образувани в резултат на отлагане от циркулиращи през микропукна-тините на въглищните пластове разтвори.

Фосфати и други неорганични фази

От фосфатите е установен минералът апатит. Той е представен от късопризматични кристали с размери 5-10 x15-20 µm, които могат да бъдат с детритусен или автогенен произход. Изказани са предположения, че автогенни фосфатни минерали могат да се формират по време на въглефикационния процес, в резултат от взаимодействие между фосфора, отделен при разлагане на органичната материя и Ca и REE от циркулиращите разтвори (Vassilev et al., 1995). Наблюдавани са също фрагменти от вулканско стъкло, които представляват сферични или ъгловати късчета с размери около 20-30 µm, чиито произход най-вероятно е свързан с ефузив-ните скали от подхранващата провинция.

Резултатите, получени при минераложкото изследване на пчеларовските въглища, показват несъмненото влияние, което активната вулканска дейност, синхронна с процесите на торфогенеза и въглефикация е имала върху образува-нето и спецификата не само на минералния, но и на геохимичния състав на въглища. В подкрепа на изказаното твърдение са и данните публикувани от Vassilev et al. (1995), за минералния и геохимичен състав на въглищата от находище Вълче поле. Двете находища са разположени в близост, формирани са по едно и също време, при сходни палеогеографски условия и са подхранвани от една и съща околна суша. За въглищата от двете находища може да се направи извода, че както минералният, така и геохимичният им състав е силно повлиян от проявилата се в непосредствена близост активна вулканска дейност и циркулиращите, в резултат на това, постмагматични хидротермални разтвори.

Заключение

Петрографските изследвания на въглищата показват, че те са с високо съдържание на пепел и сяра, а по степен на въглефикация са кафяви блестящи. Количественият мацерален анализ показва, че преобладават мацералите от групата на хуминита – основно улминит и в по-малка степен текстинит. От липоидните мацерали се установяват споринит, кутинит и резинит, а алгинитът, липтодетринитът и хлорофили-нитът се срещат в минимално количество. Инертинито-вите мацерали са представени от фунгинит, семифу-зинит и изключително рядко от инертодетринит.

Минералният състав на въглищата е разнообразен. Установени са сулфидни, силикатни, сулфатни, оксидни, карбонатни, хидрооксидни, фосфатни минерали и вулканско стъкло. Най-голямо е съдържанието на пирит, кварц и илит, а в по-малко количество се наблюдават каолинит, К фелдшпат, гипс, калцит и отчасти сидерит. Определени са и редица акцесорни минерали, чиято концентрация не надвишава 1 %. Разнообразният състав и повишеното съдържание на неорганично вещество в изследваните въглища е силно повлияно от активната вулканска и хидротермална дейност, която е протичала едновременно с процесите на торфогенеза и въглефи-кация, а също и от присъствието на оловно-цинкови, медни и полиметални минерализации в района на находище Пчеларово.

Acknowledgments: Изследването е осъществено със съдействието на програмата SYNTHESYS, финансирана от Европейския съюз и фонд научни изследвания на Софийски университет „Св. Кл. Охридски" (проект № 108/2016).

References

Йорданов, Б., С. Саров, С. Георгиев, В. Вълков, Е. Балканска, В. Гроздев, Р. Маринова, Н. Марков. – Обяснителна записка (картен лист Николово). В: *Геоложка карта на РБългария мащаб 1:50 000* (Ред. Б. Йорданов, С. Саров). София, 2008. - 104 с.

Костова, И. Предпоставки за формиране на въглища с високо съдържание на сяра. Геохимично поведение на сярата в процеса на торфогенеза и ранна диагенеза. – *Геол. и минер. ресурси, 6*, 2005. – 13-18.

Минчев, Д., А. Недялкова, С. Вълчева. Геология на въглищните басейни в България. Геология и въгленосност на Пчеларовското въглищно находище и Източните Родопи. – *Год. на Софийски университет, 58, 1,*1963/1964. – 47-74.

Casagrande, D. J. Sulphur in peat and coal. – In: *Coal and Coal-bearing Strata: Recent Advances*, Geol. Soc. Special Publication 32, (Scott, A.C., Ed.), 1987. – 87-105.

Chou, C. L. Sulfur in coals: A review of geochemistry and origin. – *Int. J. Coal Geology, 100,* 2012. - 1-13.

Gouin, J., C. Lerouge, Y. Deschamps, D. Widory, F. Laggoun-Defarge, M. Yossifova, Y. Yanev. Petrological and geochemical characterization of Ge-bearing coals from the Eastern Rhodopes, Bulgaria. - *In: Andrew, C. J., etal (Eds.), DiggingDeeper, 9th Biennial SGA Meeting, Dublin, Ireland, vol. II*, 2007. - 1521-1524.

Luther, G. W. Pyrite synthesis via polysulfide compounds. - *Geochemical et Cosmochimica Acta, 55,* 1991. - 2839-2849.

Vassilev, S., G. Eskenazy, M. Tarassov, V. Dimov. Mineralo-gy and geochemistry of vitrain lens with unique trace elements content from the Vulche Pole coal deposit, Bulgaria. – *Geol. Balc., 25*, 3-4, 1995. – 111-124.

Wilkin, R. T., H. L. Bernes. Formation processes of framboidal pyrite. – *Geochemical et Cosmochimica Acta, 61*, 1997. - 323-339.

Статията е рецензирана от проф. дгн Калинка Маркова и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и проучване на полезни изкопаеми".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, GeologyandGeophysics, 2016

ПЕТРОГРАФИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ НА ВЪГЛИЩА ОТ ПЧЕЛАРОВСКОТО НАХОДИЩЕ, ИЗТОЧНИ РОДОПИ
II ЧАСТ. ГЕОХИМИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Ирена Костова

Софийски университет „Св. Кл. Охридски", Катедра Геология, палеонтология и изкопаеми горива, 1000 София; irenko@gea.uni-sofia.bg

РЕЗЮМЕ. Изследвани са въглищни проби от находище Пчеларово. Въглищата са кафяви блестящи, високопепелни и високосерни. Цел на изследването е да се направи детайлна геохимична характеристика на пробите и да се установят елементите примеси в структурата на пирита. Приложени са следните методи: ICP-AES и ICP-MS за определяне на главните и елементите примеси във въглищата; определяне на формите на сярата и EPMA-WDX за диагностика на елементите в пирита. Във въглищата са установени 7 главни и 47 елементи-примеси, включително 15 REE. Резултатите показват висока концентрация на редица елементи. Съдържанието на U е около 30 пъти по-високо, а това на Cs около 25 пъти по-високо от средните стойности за въглища. От 10 до 12 пъти е повишено съдържанието на Mg, Cr, Ni и As, а от 5 до 8 пъти по-високи са концентрациите на Mo, Sb, K, W, Rb, V и Na. В структурата на пирита са установени елементите Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Se и Pb. Съдържанията им са сравнени с концентрацията на същите елементи в пирити във въглища от други български и чужди басейни. Резултатите показва, повишено съдържание на Zn, Ni, Pb и Cd в пчеларовските въглища. Факторите, които контролират повишеното съдържание на елементите във въглищата и в пирита са вулканската и хидротермална дейност в района на находището, присъствието на редица Pb-Zn, Cu и полиметални минерализации в района, наличието на моласовите седименти, които благоприятстват циркулирането на поствулкански разтвори, а също и разположената в близост разломна зона.

Ключови думи: Пчеларовско въглищно находище, геохимия, съдържание на елементи примеси в пирит.

PETROGRAPHY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF COAL FROM PCHELAROVO DEPOSIT, THE EASTERN RHODOPES
PART II. GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION

Irena Kostova
Sofia University "St. Kliment Ohridski", Department of Geology, Paleontology and Fossil Fuels, 1000 Sofia; irenko@gea.uni-sofia.bg

ABSTRACT. Coal samples from Pchelarovo deposit were studied. The coals are subbituminous, with high ash and high sulfur content. The goal of the investigation is to perform detailed geochemical characteristics of bulk coals and to determine the trace elements in pyrite structures. For the purpose of the present study the following methods have been applied – ultimate analysis (ICP-AES), sulfur forms determination, ICP-MS and EPMA-WDX analysis. Seven major and 47 trace elements, including 15 REE were determined. The data show that there is a high concentration of number elements. The amount of U in coals is about 30 times higher and that of Cs is about 25 times higher than the average content for coals. The concentration of Mg, Cr, Ni and As is from 10 to 12 times higher and Mo, Sb, K, W, Rb, V and Na is from 5 to 8 times higher than average for coal. The elements Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Se and Pb have been established in pyrite. The amount of these elements is compared with the amount of the same elements in other Bulgarian and worldwide coals. The data show an increased content of Zn, Ni, Pb and Cd in the Pchelarovo coals. The factors which controlled the higher concentrations of the elements in bulk coals and in pyrite are the presence of a hydrothermal and volcanic activity in the deposit's area, the presence of the Pb-Zn, Cu and polymetallic mineralizations in the region, the availability of molasse-type surrounding sediments which are permeable to circulating post-volcanic solutions and nearby situated fault zone.

Keywords: Pchelarovo coal deposit, geochemistry, trace elements in pyrite.

Въведение

Съществува оскъдна информация за въглищата от Пчеларовското находище. Първото и единствено описание на палеогенските въглища и въглепроявления в Източните Родопи е направено от Минчев и колектив през 60-те години на XX век (Минчев и др., 1963, 1964). В публикуваните от тях данни въглищните хоризонти и пластове са разгледани в контекста на конкретната геоложка обстановка на района и е направена стратиграфска подялба на седиментите. Изложено е схващането за съществуването на два въгленосни хоризонта, като въглищата в тях са с различна степен на въглефикация. Представени са данни за условията на въгленатрупване и е направена оценка на перспектив-ността на пчеларовското находище (Минчев и др., 1964). Данни за съдържанието на отделни елементи-примеси (V, Cr, Co, Ni, B, As, Sb, Ge, Ag, Be и др.) се срещат в работите на Ескенази и Минчева (1987); Eskenazy (1987, 1995a, 1995b, 1996, 2006; Eskenazy et al., 1994; Eskenazy and Mincheva, 1998). Кратка петроложка и геохимична характеристика на въглищата и въглепроявленията в Източните Родопи и изводи за обстановката по време на отлагането им, направени на базата на определяне на изотопите на сярата има в работата на Gouin et al.

(2007). Подробно описание на геологията на находището, стратиграфска подялба на въгленосните седименти и описание на въглищните хоризонти и пластове е дадено в първата част на настоящата работа Костова (2016).

Цел на изследване е да се извърши детайлна геохимична характеристика на въглищата и да се установят елементите-примеси в пирита чрез прилагане на нови и съвременни изследователски методи.

Методика на изследване

Опробвани са въглищните пластове от втори въгленосен хоризонт на находище Пчеларово, като са взети три въглищни проби от разкрития, разположени южно от с. Пчеларово. Извършени са комплексни петрографски и геохимични изследвания, които включват определяне на основните елементи (C, H и N) на въглищата, съдържанието на обща и видовете сяра, концентрацията на елементи-примеси във въглищата и количеството на елементи-примеси в пирита. За целта са приложени следните методи: ICP-AES (апарат Thermo iCap 6500 Duo) за определяне на основните елементи; стандартна химична методика в съответствие с ISO стандартите за определяне на сярата; ICP-MS (апарат Agilent 7700x) за определяне на елементите-примеси във въглищата и EPMA-WDX (апарат Cameca SX100 Electron Microprobe) за диагностика на елементите в пирита.

За определяне на съдържанието на някои вредни елементи-примеси в пиритни зърна и кристали, разпръснати сред въглищното вещество, е извършено 24-часово EPMA-WDX сканиране върху пирити в полирани въглищни проби, предварително покрити с въглерод. По този начин е установено съдържанието на Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Se и Pb в осем пиритни обекта. Всички геохимични изследвания са осъществени в департамента по минералогия на Музея по естествена история в Лондон.

Резултати и дискусия

Обща характеристика на въглищата

С цел да се извърши основна характеристика на въглищата от Пчеларовското находище са определени съдържанието на пепел, концентрацията на основните елементи на органичното вещество (O, H, N), съдържанието на обща и видовете сяра, а също и на органичния въглерод. Извършена е Rock Eval пиролиза, измерена е T max и е изчислен водородният индекс. Измерена е отражателната способност на улминита. Резултатите за съдържанието на основните елементи и видовете сяра са дадени в Таблица 1, а останалите данни, свързани с основната характеристика на въглищата са представени в Таблица 1 от първата част на настоящото изследване (Костова, 2016).

Резултатите показват, че въглищата от втори хоризонт са с високо съдържание на пепел (29,8-32,1 %), а стойностите на T_{max} (415-420 C^0) и на отражателната способност на улминита (0,47-0,49 %) показват, че по степен на въглефикация те са кафяви блестящи. Въглищата са с високо съдържание на обща сяра (около 5-6 wt %), като преобладаваща е органичната сяра (табл. 1). Произходът и разпределението на сярата в пчеларовските въглища подробно са дискутирани в първата част на статията (Костова, 2016).

Таблица 1.
Съдържание на основните елементи, общата и видовете сяра във въглища от пчеларовското находище

Проби	Елементен анализ (daf), wt%			Форми на сярата (a), wt%			
	C	H	N	S_t	S_{py}	S_{sulf}	S_{org}
1	31,9	4,04	0,41	6,02	1,76	0,59	3,67
2	29,8	3,12	0,56	5,96	1,65	0,78	3,53
3	32,1	3,97	0,53	4.98	1,65	0,35	2,98

a – на аналитична маса; daf – на суха и свободна от пепел маса.

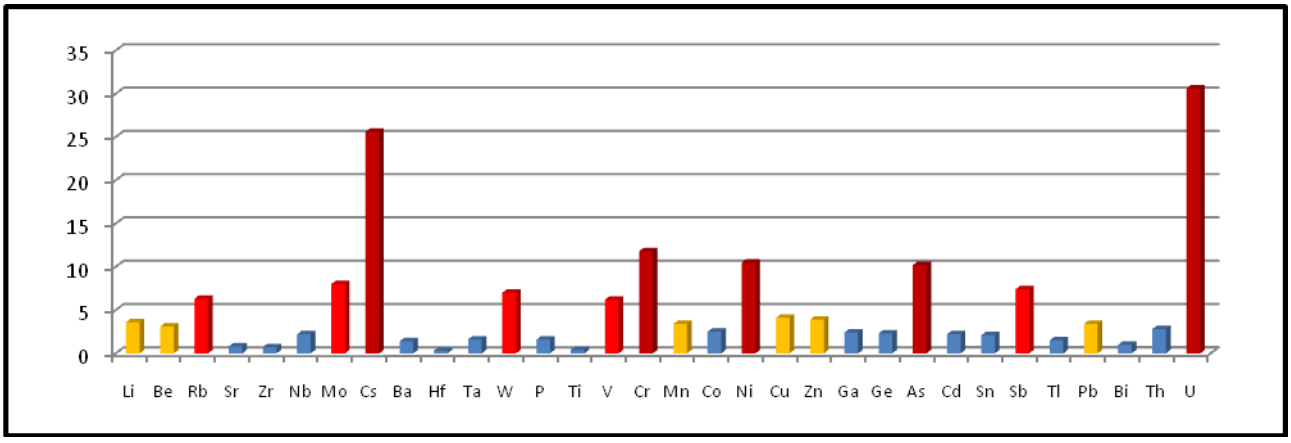
Геохимична характеристика

Определено е съдържанието на 7 главни и 49 елементи-примеси, включително 15 редкоземни елемен-ти (REE). Резултатите са показани в Таблица 2. Изчислен е факторът на обогатяване на елементите, който представлява отношение на количеството на даден елемент в изследваните въглища към кларка (средното съдържание на същия във въглища по света). Разпределението на елементите по фактор на обогатяване е отразено на фигура 1. Елементите условно са разделени на 5 групи: I) елементи, чието съдържание е по-ниско от стойността на кларка, II) елементи, чието съдържание е от 1 до 3 пъти по-високо от кларка, III) елементи със съдържание от 3 до 5 пъти по-високо от кларка, IV) елементи с концентрация от 5 до 10 пъти по-висока от кларка и V) елементи с концентрация 10 пъти и повече по-висока от кларка.

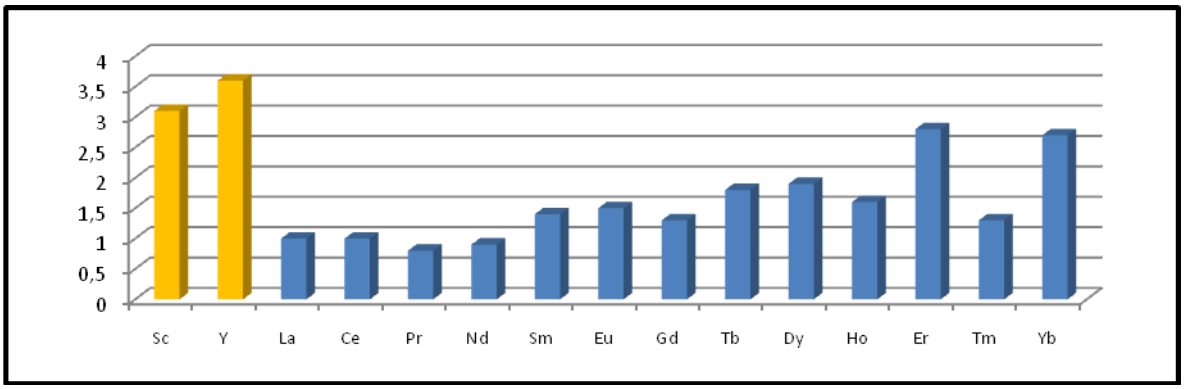
I група елементи:
$Nd_{0.9} > Sr_{0.8} = Pr_{0.8} > Zr_{0.7} > Ca_{0.4} = Ti_{0.4} > Hf_{0.3}$
II група елементи:
$Al_{2.9} > Th_{2.8} = Er_{2.8} > Yb_{2.7} > Co_{2.5} > Ga_{2.4} > Ge_{2.3} > Cd_{2.2} = Nb_{2.2} > Lu_{2.1} = Sn_{2.1}$
$Dy_{1.9} > Tb_{1.8} > Ta_{1.6} = P_{1.6} = Ho_{1.6} > Tl_{1.5} = Eu_{1.5} > Ba_{1.4} = Sm_{1.4} > Gd_{1.3} = Tm_{1.3}$
$Bi_{1.0} = La_{1.0} = Ce_{1.0} = Fe_{1.0}$
III група елементи:
$Cu_{4.1} > Zn_{3.9} > Y_{3.6} = Li_{3.6} > Mn_{3.4} = Pb_{3.4} > Be_{3.1} = Sc_{3.1}$
IV група елементи:
$Mo_{8.0} > Sb_{7.4} > K_{7.1} > W_{7.0} > Rb_{6.3} > V_{6.2} > Na_{5.3}$
V група елементи:
$U_{30.6} > Cs_{25.6} > Mg_{12.4} > Cr_{11.8} > Ni_{10.5} > As_{10.2}$

Данните показват, че с най-висока концентрация (10 пъти по-висока от кларка) са елементите U, Cs, Mg, Cr, Ni и As. Особено впечатление правят екстремно високите съдържания на U (30 пъти по-високо от кларка) и Cs (25 пъти по-високо от кларка). Десет пъти по-висока концентрация имат елементите As, Ni и Cr, а от 3 до 10 пъти по-висока - елементите Mo, Sb, K, W, Rb, V, Na, Cu, Zn, Y, Li, Mn, Pb, Be и Sc. Голяма част от изброените елементи (U, Cr, Ni, As, Mo, Sb, V, Cu, Zn, Mn, Pb, Be), а също и елементите Th, Co, Cd, Sn, Tl и Ba се отнасят към групата на вредните и потенциално токсични елементи, чието постъпване в атмосферата, при изгаряне на въглищата в ТЕЦ, оказва негативно влияние върху околната среда и човешкото здраве. Значителна част от тях лесно преминават във водоразтворима форма, което води до замърсяване на подземните водоизточници.

а



б



Фиг. 1. Разпределение на елементите-примеси (а) и REE (б) във въглища от Пчеларовското находище по фактор на обогатяване. Съдържание по-високо от кларка за въглищата: до 3 пъти - синьо; от 3 до 5 пъти - жълто; от 5 до 10 пъти– червено; > 10 пъти– тъмно червено,

Торият се концентрира основно в теригенните примеси на въглищата, най-вече в смесено-слойните глинести минерали и частично в органичното вещество. Според Goldschmit (1958) основното количество от Th в седиментния цикъл е утаен с глинестите седименти. За разлика от Th, U участва преимуществено в състава на органичните съединения (Ескенази, 1992). Изключително високото съдържание на U, а отчасти и на Th в изследваните въглища се потвърждава и от данни, публикувани от Ескенази (1992) за същите въглища. Предполага се, че това е свързано с вулканската активност в района на находището. Покривката на въгленосната формация на пчеларовското находище е представена от олигоценски пирокластични седименти, съставени предимно от андезити, андезитови туфобрекчи, туфи и туфити. Предполага се, че в резултат на циркулиране на поствулкански хидротермални разтвори през въглищните пластове от тях се извлича Th и най-вече на U (Ескенази, 1992).

Съществуват разнообразни форми на свързване на V, Cr, Ni и Co във въглищата – биогенна, органична, сулфидна и теригенна (Ескенази и Минчева, 1987). Биогенната форма е наследена от растенията въглеобразователи и е характерна за Co и Ni. Като елементи с незапълнени d-орбитали V, Cr, Co и Ni образуват разнообразни комплекси с органични лиганди, което обяснява органичната им форма на свързване във въглищата. Доказано е, че докато V и отчасти Cr се свързват преимуществено с хуминовите киселини, то Co и Ni изглежда се свързват под формата на други органични съединения (Ескенази и Минчева, 1987). Въпреки силно изразената роля на органичното вещество като концентратор на Cr, Ni, Co, техен носител са също Fe-дисулфиди и силикатните минерали. Кобалтът и Ni се явяват характерни примеси в кристалната решетка на пирита, а Cr, Ni и Co участват като изоморфни примеси в състава на редица силикатните минерали.

Арсенът се установява основно в пирита, което се потвърждава и от настоящото изследване, но е възможно да присъства и в органичните съединения, докато Sb се свързва преимуществено с органичната част на въглищата. Един от факторите, който контролира обогатяването на As, Sb във въглищата могат да бъдат палеотермалните разтвори, които циркулират сред въглищните пластове. Повишеното съдържание на As и Sb в пчеларовските въглища е свързано с хидротермалната и вулканска активност в региона на Източните Родопи по време на торфогенезата. Находището се намира в Палеогенската моласова фор-мация, в която има Sb минерализация, представена от стибнит със съдържание на As над 1000 ppm (Eskenazy, 1995a). Берилият има афинитет както към органичното така и към неорганичното вещество, но във въглища, в които има повишено съдържание, той обикновено е свързан с органичните съединения (Eskenazy, 2006).

Таблица 2.

Съдържание на елементите във въглищата

Елементи	Кларк*	Съдържание	Фактор на обогатяване
Литофилни метали			
Li	12	43,7	3,6
Be	1,6	4,97	3,1
Na %	0,12**	0,64	5,3
Mg %	0,13**	1,61	12,4
Al %	3,17**	9,24	2,9
K %	0,16**	1,14	7,1
Ca %	0,88**	0,31	0,4
Rb	14	88,4	6,3
Sr	110	85,7	0,8
Zr	36	25	0,7
Nb	3,7	8,0	2,2
Mo	2,2	17,5	8,0
Cs	1,0	25,6	25,6
Ba	150	204	1,4
Hf	1,2	0,3	0,3
Ta	0,28	0,45	1,6
W	1,1	7,7	7
Неметали			
Si %	-	27,5	-
P	230	370	1,6
Сидерофилни метали			
Ti	800	280	0,4
V	25	154	6,2
Cr	16	189	11,8
Mn	86	290	3,4
Fe %	3,40**	3,32	1,0
Co	5,1	13	2,5
Ni	13	136	10,5
Халкофилни метали и металоидни неметали			
Cu	16	66,2	4,1
Zn	23	89,1	3,9
Ga	5,8	14	2,4
Ge	2,2	5,2	2,3
As	8,3	85	10,2
Cd	0,22	0,49	2,2
Sn	1,1	2,4	2,1
Sb	0,92	6,81	7,4
Tl	0,63	0,93	1,5
Pb	7,8	27,1	3,4
Bi	0,97	0,99	1,0
Радиоактивни елементи			
Th	3,3	9,1	2,8
U	2,4	73,4	30,6
Редки и редкоземни елементи			
Sc	3,9	12,2	3,1
Y	8,4	30,2	3,6
La	11	11,1	1,0
Ce	23	23,7	1,0
Pr	3,5	2,9	0,8
Nd	12	11,3	0,9
Sm	2,0	2,76	1,4
Eu	0,47	0,68	1,5
Gd	2,7	3,49	1,3
Tb	0,32	0,58	1,8
Dy	2,1	3,91	1,9
Ho	0,54	0,85	1,6
Er	0,93	2,62	2,8
Tm	0,31	0,40	1,3
Yb	1,0	2,74	2,7
Lu	0,20	0,41	2,1

* по Ketris and Yudovich (2009)] ** по Dai et al. (2011).

Три са основните фактори, които контролират присъствието на Cu, Zn и Pb във въглищата: органичното вещество; формирането на собствени сулфидни минерали и/или в кристалната решетка на Fe-дисулфиди и присъствието им в детритусни минерали (Eskenazy, 1995b). Медта, цинкът и оловото формират комплексни метал-органични съединения с хуминовите и фулвинови киселини. Източник на елементите могат да бъдат разтвори, които постъпват в торфеното блато от падхранващата провинция, богата на медни, цинкови и оловни орудявания или от растенията въглеобразу-ватели, които по правило са богати на Cu и Zn. Възможен източник на елементите могат да бъдат и хидротермалните разтвори, продукт от вулканска дейност, какъвто е случаят с пчеларовското находище и намиращия се в близост Олигоценски вулканизъм. Друг механизъм за свързване на Cu, Zn и Pb е този в кристалната решетка на Fe-дисулфиди и най-вече на пирита, факт, който се доказва и от настоящото изследване.

Редкоземните елементи (REE), чието разпределение е показано на фигура 1 (б) попадат преимуществено във II-та група елементи, чиито фактор на обогатяване е от 1 до 3 (т. е. със съдържание от 1 до 3 пъти по-високо от кларка), като Y и Sc са с най-висока концентрация (повече от 3 пъти по-висока от кларка). Неорганичната форма на присъствие на REE преобладава, като основен техен носител са фосфатните и глинести минерали. Съществуват данни за слабо обогатяване на тежките редкоземни елементи (HREE), в сравнение с леките (LREE) във въглищата. Като фактор, който оказва влияние върху фракционирането им е способността на HREE да формират по-стабилни комплексни органични съединения от LREE в сравнение с концентрацията на REE в хондрити и шисти, (Eskenazy, 1999). В настоящото изследване не се забелязва подобна тенденция при разпределението на REE, което вероятно се дължи на факта, че анализираните проби са сравнително високопепелни. Освен това се счита, че HREE показват по-голям афинитет към органичното вещество, отколкото LREE (Querol et al., 1995).

В заключение може да се каже, че значителната концентрация на редица елементи в пчеларовските въглища се дължи основно на присъствието на хидротермална и вулканска дейност в района на находището, а също и на присъствието на редица Pb-Zn, Cu и полиметални минерализации и орудявания в района на Източните Родопи. Принос за внасянето на редица елементи, включително REE, имат и включващите въглищните пластове моласови седименти, които са благоприятствали циркулирането на поствулкански разтвори, а също и разположената в близост разломна зона.

Елементи примеси в пирита

С цел да се установят елементите примеси в пирита (най-разпространеният минерал в пчеларовските въглищата), са избрани и сканирани в продължение на 24 часа 8 броя пиритни обекти. Обектите включват пиритни фрамбоиди, отделни пиритни зърна и кристали. В резултат на сканирането са получени данни за съдържанието на Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Se и Pb, които са представени в таблица 3. От резултатите се вижда, че най-висока е

концентрацията на Ni, Pb и Cd, а най-ниска тази на Se и Mn. За да се добие представа за мащаба на натрупване на елементите в пирита е направен преглед на информацията за съдържанието на същите елементи в пирити в други български (Бели брег и Станянци) и различни световни въглищни басейни в Пенсилвания, Кентъки, Алабама, Индиана и Китай. Сравнителната характеристика е дадена в таблица 4. В сравнение с лигнитите от Станянския и Белобрежки басейни, пиритите във въглищата от Пчеларовското находище имат най-високо съдържание на Ni (до 0,15 wt %, в сравнение с до 0,05 wt % за лигнитите от белобрежкия басейн), Zn (до 0,06 wt %, в сравнение с до 0,02 wt % за лигнитите от станянския и белобрежкия басейни), Se (до 0,03 wt %, в сравнение с до 0,01 wt % за лигнитите от станянския и белобрежкия басейни) и Cd (до 0,08 wt %, в сравнение с до 0,05 wt % за лигнитите от белобрежкия басейн). Сравнено със съдържанието на елементите в пирити от други въглищни басейни по света, прави впечатление високата концентрация на Zn (най-висока за всички сравнявани въглища) и на Pb, която достига до 0,09 wt %.

Талбица 3.
Елементи-примеси в пирит във въглища от находище Пчеларово

Сканирани пиритни полета	1	2	3	4	5	6	7	8	Min	Max	Средно
S	48,68	50,94	51,84	49,89	51,55	51,21	50,54	51,15	-	-	-
Fe	45,02	45,06	45,89	45,58	45,52	45,75	45,02	45,77	-	-	-
Mn	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,03	0,02
Co	0,05	0,04	0,05	0,03	0,02	0,05	0,04	0,01	0,01	0,05	0,03
Ni	0,00	0,02	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,15	0,00	0,15	0,08
Cu	0,00	0,05	0,02	0,02	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,05	0,03
Zn	0,06	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05	0,03	0,00	0,00	0,06	0,03
Cd	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,04
As	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,06	0,02	0,06	0,04
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,03	0,02
Pb	0,09	0,05	0,00	0,06	0,04	0,08	0,02	0,00	0,00	0,09	0,05
Общо	93,91	96,21	97,83	95,66	97,26	97,29	95,73	97,18	-	-	-

Редица изследвания показват, че FeS_2 и пиритът в частност, който представлява един от най-разпространените минерали във въглищата, се явяват основен носител на редица изключително чувствителни по отношение на околната среда и човешкото здраве елементи примеси. Те заместват S или Fe в кристалната структура на пирита и другите FeS_2. Механизмите и процесите, които водят до свързване на елементите с пирита, са изложени подробно от Kolker (2012), а за лигнитите от Белобрежкия и Станянския басейни са публикувани от Kostova (2016) и Kostova and Isaeva (2016), като тук накратко са изложени само основните положения. Счита се, че елементите As и Se заместват S в кристалната структура на пирита, докато металите Pb, Zn, Cu, Co, Mn, Ni и Cd заместват Fe. Съществуват няколко етапа на формиране на пирита във въглищата. Първият етап се осъществява през ранната диагенеза, вторият протича по време на късната диагенеза (същинската въглефикация), а третият обхваща поствъглефикационните процеси, като и през трите етапа се осъществява интензивно заместване на определени елементи в структурата на Fe-дисулфиди. При най-рано образуваните Fe-дисулфиди, какъвто е случаят с фрамбоидалния пирит, заместването на определени елементите в кристалната му структура се контролира от съвместното действие на два фактора: присъствието на бактерии и на подходящи за заместване структури, каквито са тези на Fe-моносулфиди в средата. Присъствието на метали (свободни или под формата на металорганични съединения) и редукционните условия в торфеното блато също благоприятстват включването на редица метални и други йони в структурата на пирита.

Резултатите показват, че пиритът във въглищата от пчеларовското находище е със сингенетично-диагенетичен произход, което предполага свързване на елементите през първите два етапа от формирането му. За източник на елементите-примеси и най-вече на металните йони (Pb, Zn, Cu, Co, Mn, Ni и Cd) в пирита може да се счита присъствието на редица оловно-цинкови, медни и полиметални орудявания от подхранващата провинция, вулканската активност, която се е проявила в близост до торфеното блато по време на развитието му, а също и моласовите седименти, които включват въглищните пластове и благоприятстват циркулирането на хидротермални разтвори през тях.

Таблица 4.

Елементи-примеси в железни дисулфиди (пирит) във въглища от находище Пчеларово и други изследвани въглища по света (в wt % по Kolker 2012)

Мине-рал	Изследвани въглища	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Pb	Cd	Mn	Литературни източници
Пирит	Пчеларовски басейн	0,01-0,05	dl-0,15	dl-0,05	dl-0,06	0,02-0,06	dl-0,03	dl-0,09	dl-0,08	dl-0,03	настоящо изследване
Пирит	Станянски басейн, България	0,01-0,06	dl-0,04	dl-0,05	dl-0,02	dl-0,03	dl-0,01	0,03-0,11	dl-0,04	dl-0,03	Kostova and Isaeva (2016)
Пирит	Белобрежки басейн, България	dl-0,07	dl-0,05	0,03-0,09	dl-0,02	0,07-0,20	dl-0,01	dl-0,06	dl-0,05	dl-0,05	Kostova (2016)
Пирит	Upper Freeport, Pennsylvania, USA	-	-	-	-	dl-1,5	dl-0,20	-	-	-	Minkin et al. (1984)
Пирит	Upper Freeport, Pennsylvania, USA	-	-	-	-	0,06-1,9	-	-	-	-	Ruppert et al. (1992)
Пирит	Fire Clay coal bed, Kentucky, USA	-	-	-	-	dl-3,5		-	-	-	Ruppert et al. (1992)
Пирит*	Appalachian and Powder River basins, USA	dl-0,23	dl-0,45	-	-	dl-4,9	dl-0,1	-	-	-	Kolker et al. (1997)
Пирит*	Black Warrior Basin Pittsburgh coal	dl-0,16	dl-0,16	dl-0,16	dl-0,04	dl-2,68	dl-0,06	dl-0,04	-	-	Kolker, Huggins (2007)
Пирит	Coals from Guizhou province, China	-	-	0,02-0,12	-	1,03-5,76	-	-	-	-	Ding et al. (2001)
Пирит	Black shale, Guizhou province, China	dl-0,29	0,03-l,37	dl-0,79	dl-0,05	dl-0,92	dl-0,14	-	-	-	Belkin, Luo (2008)

* Пиритът и марказитът не са разграничени, но пиритът преобладава; dl - съдържанието е под границата на чувствителността на анализа.

Присъствието на елементи в кристалната структура на пирита има отношение към почти всички аспекти, свързани с използването на твърдите горива. Установените елементи примеси в пирити от пчеларовските въглища спадат към групата на вредните и потенциално токсични елементи, които се изпускат в атмосферата при изгаряне на въглищата в ТЕЦ или се отделят в околната среда при окислението или самозапалването им. Според Abraities et al. (2004), включването на примеси в кристалната решетка на пирита влияе върху електричните му свойства, като причинява дефекти в кристалната му структура. Тези дефекти водят до положително или отрицателно зареждането на пиритните частиците. Съществуват данни, че дори съвсем незначително количество примеси влияят върху електричните свойства на пирита, като повишават склонността му да се окислява, което може да доведе до редица неблагоприятни за околната среда и човешкото здраве ефекти (Lehner and Savage, 2008). От една страна, окислението на FeS_2 във въглищата и отпадните продукти води до отделяне на свързаните елементи в природата и до подкиселяване на водите, а от друга страна процесът на окисление на пирита е екзотермичен и може да доведе до самозапалване на въглищата в пласта, в минните изработки, в складовите бази или в депата, където се съхраняват въглищните отпадъци.

Заключение

Извършено е геохимично изследване на високосерните и високопепелни въглища от находище Пчеларово. Резултатите показват висока концентрация на редица елементи, като за някои от тях са регистрирани изключително високи стойности. Съдържанието на U е около 30 пъти по-високо, а това на Cs около 25 пъти по-високо от средните стойности за въглища. От 10 до 12 пъти е повишено съдържанието на Mg, Cr, Ni и As, а от 5 до 8 пъти по-високи са концентрациите на Mo, Sb, K, W, Rb, V и Na. Установени са елементите примеси (Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Se и Pb) в кристалната структура на пирита, като съдържанията им са сравнени с концентрацията на същите елементи в пиритни обекти във въглища от други български и чужди басейни. Направената сравнителна характеристика показва, повишено съдържание на Zn, Ni, Pb и Cd в изследваните въглища.

Повишеното съдържание на редица елементи, както във въглищата като цяло, така и в пирита се дължи на проявлението на хидротермална и вулканска дейност в района на находището, а също и на присъствието на редица Pb-Zn, Cu и полиметални минерализации в района. Принос за повишената концентрация на елементи имат и моласовите седименти, които са благоприятствали циркулирането на поствулкански разтвори, а също и разположената в близост разломна зона.

Acknowledgments. Изследването е осъществено със съдействието на програмата SYNTHESYS, финансирана от Европейския съюз и фонд научни изследвания на Софийски университет „Св. Кл. Охридски" (проект № 108/2016).

References

Ескенази, Г. Геохимия на торий и уран в български въглища. - *Годишник на Софийски университет, 83, 1,* 1992. - 43-70.

Ескенази, Г., Е. Минчева. Ванадий, хром, кобалт и никел в български въглища. - *Годишник на Софийски университет, 81, 1,* 1987. - 133-168.

Костова, И. Петрография, минералогия и геохимия на въглища от Пчеларовското находище, Източни Родопи. Петрографска и минераложка характеристика – I част. – *Годишник на Минно-геоложки университет „Св. Ив. Рилски",* 2016. – (под печат).

Минчев, Д., Г. Григоров, Е. Бланк. Нови данни за стратиграфията на въгленосния приабон северно от гр. Кърджали – Източните Родопи. - *Годишник на Софийски университет, LVII, 1,* 1962/1963. – 267-281.

Минчев, Д., А. Недялкова, С. Вълчева. Геология на въглищните басейни в България. Геология и въгленосност на Пчеларовското въглищно находище и Източните Родопи. – *Годишник на Софийски университет, 58, 1,* 1963/1964. – 47-74.

Abraitis, P., R. Pattrick, D. Vaughan. Variations in the compositional, textural and electrochemical properties of natural pyrite: a review. – *International Journal of Mineral Processing, 74*, 2004. - 41–59.

Belkin, H. E., K. Luo. Late-stage sulfides and sulfarsenides in Lower Cambrian black shale (stone coal) from the Huangjiawan mine, Guizhou province, People's Republic of China. – *Mineral. and Petrol., 92*, 2008. - 321–340.

Dai, S., X. Wang, Y. Zhou, J. C. Hower, D. Li, W. Chen, X. Zhu. Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic, and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing. Southwest China. - *Chem. Geol., 282,* 2011. - 29–44.

Ding, Z., B. Zheng, J. Long, H. Belkin, R. Finkelman, C. Chen, D. Zhou, Y. Zhou. Geological and geochemical characteristics of high arsenic coals from endemic arsenosis areas in southwestern Guizhou Province, China. – *Applied Geochem., 16,* 2001. - 1353–1360.

Eskenazy, G. Rare earth elements and yttrium in lithotypes of Bulgarian coals.– *Organic geochemistry, 11, 2,* 1987. - 83-89.

Eskenazy, G. Geochemistry of arsenic and antimony in Bulgarian coals. – *Chemical geology, 119,* 1995a. - 239-254.

Eskenazy, G. Geochemistry of copper, zinc and lead in Bulgarian coal deposits. - *Ann. Univ. de Sofia "St. Kliment Ohridski", 1 – Geol.,* 87, 1995b. - 59-84.

Eskenazy, G. Geochemistry of germanium in Bulgarian coals. – *Fuel and Energy Abst., 37,* 1996. - 170.

Eskenazy, G. Aspects of the geochemistry of rare earth elements in coal: an experimental approach. - *Int. J. Coal Geology, 38,* 1999. - 285-295.

Eskenazy, G. Geochemistry of beryllium in Bulgarian coals. - *Int. J. Coal Geology, 66,* 2006. - 305-315.

Eskenazy, G., D. Delibaltova, E. Mincheva. Geochemistry of boron in Bulgarian coals. - *Int. J. Coal Geology, 25,* 1994. - 93-110.

Eskenazy, G., E. Mincheva. On the coal geochemistry of silver. - *Ann. Univ. de Sofia "St. Kliment Ohridski", 1 – Geol., 104*, 1998. - 69-81.

Goldschmidt, V. *Geochemistry*. Oxford, Clarendon Press, 1958. – p 730.

Gouin, J., C. Lerouge, Y. Deschamps, D. Widory, F. Laggoun-Defarge, M. Yossifova, Y. Yanev. Petrological and geochemical characterization of Ge-bearing coals from the Eastern Rhodopes, Bulgaria. - In: *Andrew, C. J., et al (Eds.), Digging Deeper, 9th Biennial SGA Meeting, Dublin, Ireland, vol. II*, 2007. - 1521-1524.

Ketris, M., Y. Yudovich. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. – *Int. J. Coal Geology, 78,* 2009. - 135-148.

Kolker, A. Minor element distribution in iron disulfides in coal: A geochemical review. - *Int. J. Coal Geology, 94,* 2012. - 32-43.

Kolker, A., R. Finkelman, C. Palmer, H. Belkin. Microprobe study of minorand trace elements in sulfides in selected U.S. coal samples. – In: *Geological Society of America, Abstracts, 29 (6)*, 1997. - 204–205.

Kolker, A., F. Huggins. Progressive oxidation of pyrite in five bituminous coal samples: An As XANES and 57Fe Mössbauer study. – *Applied Geochem., 22,* 2007. - 778–787.

Kostova, I. Mineralogical composition and some hazardous trace elements related to pyrite in coals from Beli Breg basin, Bulgaria. – *Ann. Univ. de Sofia "St. Kliment Ohridski", 1 – Geol., 104*, 2016. - 123–136.

Kostova, I., E. Isaeva. Petrology, mineralogy and geochemistry of lignite from Stanyantsi basin, Bulgaria. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 2016. (in press).

Lehner, S.W., K. S. Savage. The effect of As, Co, and Ni impurities on pyrite oxidation kinetics: Batch and flow-through reactor experiments with synthetic pyrite. - *Geochimica et Cosmochimica Acta, 72,* 2008. - 1788–1800.

Minkin, J., R. Finkelman, C. Thompson, E. Chao, L. Ruppert, H. Blank, C. Cecil. Microcharacterization of arsenic- and selenium-bearing pyrite in Upper Freeport coal, Indiana County, Pennsylvania. – *Scanning Electron Microscopy, 4*, 1984. - 1515–1524.

Querol, X., J. L. Fernandez-Turiel, A. Lopez-Soler. Trace elements in coal and their behavior during combustion in a large power station. – Fuel, 74, 3, 1995. – 331-343.

Ruppert, L.F., J. A. Minkin, J. J. McGee, C. B. Cecil. An occurrence of arsenic-bearing pyrite in the Upper Freeport coal bed, west-central Pennsylvania. – *Energy & Fuels, 6,* 1992. - 120–125.

Статията е рецензирана от проф. дгн Калинка Маркова и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и проучване на полезни изкопаеми".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ИНТЕГРАЛНА ГЕО-БАЗА ДАННИ ЗА АКВАТОРИЯТА НА АВРЕНСКОТО КРАЙБРЕЖИЕ (Н. ГАЛАТА ДО Н. ИЛАНДЖИК)

Богдан Проданов, Любомир Димитров

Институт по океанология "Фритьоф Нансен", БАН, 9000 Варна; bprodanov@io-bas.bg, geos@io-bas.bg

РЕЗЮМЕ. За съвременно тълкуване и комплексна интерпретация на геоморфоложките и геоложки условия на континенталния шелф пред Авренското крайбрежие между н. Галата и н. Иланджик е изградена интегрална гео-база данни. В нея са използвани данни за морското дъно от иновативни дистанционни методи на изследване: еднолъчево ехолотиране, картиране с многолъчева сонарна система (МСС) Seabat'7111 с 100% покритие, заснемане с локатор за страничен обзор и седиментен профилограф. За 231 геоложки станции, са представени първичните седиментоложки анализи, както и литологията на дънните седименти, която е приведена в единна класификационна система. Дебелините на съвременните утайки са определени по данни от поддънен профилограф. Дигитализирана е съвременна водна линия в М 1:5 000 от ортофото изображения с точност 0,5 m. От цифров модел на дъното с резолюция 2 m е построена батиметрична карта с интервал между изобатите 0,5 m и са определени границите на различните морфоложки зони на шелфа. Всички данни са анализирани в ГИС среда и са обединени в интегрална база данни. Информацията е поделена на два основни типа данни: векторни и растерни. Съчетаването на данни за шелфа от съвременни изследвания с модерни технологии и фактически материали от научния фонд на Института по океанология „Фритьоф Нансен" в интегрална гео-база данни позволи актуализиране и детайлизиране на морфоложкото зониране на шелфа пред Авренското крайбрежие. Изяснено е пространственото разпределение на литоложките разновидности и дебелината на холоценските седименти в дълбочина до континенталния склон

Ключови думи: Гео-база данни, Авренско крайбрежие, континентален шелф, морфоложко зониране, многолъчева сонарна система, географски информационни системи

INTEGRATED GEO-DATABASE OF SEABED DATA IN FRONT OF AVREN COAST, BULGARIAN BLACK SEA (CAPE GALATA – CAPE ILANDZHIK)

Bogdan Prodanov, Lyubomir Dimitrov
Institute of oceanology "Fridtjof Nansen", BAS, 9000 Varna; bprodanov@io-bas.bg, geos@io-bas.bg

ABSTRACT. An integrated geo-database for the continental shelf in front of Avren coast (between cape Galata and cape Ilandzhik) was created to facilitate contemporary and complex interpretation of geological and geomorphological settings of the area. It comprises seabed data gathered by innovative methods like Multibeam Echosounder System (MBES SeaBat 7111) data with 100% coverage, side scan and satellite imaging and sediment profiling. Data from 231 geological stations are analyzed by standard sedimentological procedures and results are combined into a single classification system. Thicknesses of contemporary seabed deposits are determined based on sub bottom sediment profiler data. Up to date coastline was digitized using orthophoto mosaics with 0.5 m accuracy. Based on seabed digital terrain model (DTM) with 2 m resolution a high accuracy bathymetric map with 0.5 m isobaths spacing was built, serving to determine different morphological zones within the continental shelf. All aforementioned data are combined into a geospatial database, analyzed by Geographic Information Systems (GIS) and are separated into two main categories of data models: raster and vector. Combining results of contemporary shelf explorations and archive materials from the Institute of Oceanology "Fridtjof Nansen" allows detailed update of seabed relief of the shelf in front of Avren coast with respect to morphological zonation. Similar morphological zoning of the coastal zone between c. Galata and c. Ilandzhik is proposed on the ground of morphodynamic activity. The spatial distribution of seabed lithological varieties and thickness of Holocene sediments up to continental slope are also defined.

Key words: Geo-database, Avren plateau coastal zone, continental shelf, morphological zonation, Multibeam echosounder system, Geographic information systems (GIS)

Въведение

С приемането на Република България в Европейския Съюз, страната ни пое редица обвързващи ангажименти, произтичащи от действащи директиви на европейско ниво. „Рамкова директива за местообитанията", „Рамкова директива за водите" и „Рамкова директива за морска стратегия" ангажират с комплексно картиране на сухоземните и акваториално-морските участъци на страната. Това налага системно проучване и комплексно изследване на Българския сектор от Черно море, като геоморфоложкото и геоложко картиране на морското дъно се явяват първостепенна задача от национално значение. През последните десетилетия човешкото въздействие върху морската околната среда достига безпрецедентни нива. За да се улесни интегрираното управление на морската околна среда и да се оптимизира морското пространствено планиране, с цел смекчаване на тези въздействия, е необходимо да се подобри нашето разбиране относно морското дъно. За изследване на съвременните геоложки процеси и генетична интерпретация на основните геоморфоложки единици, пространственото разпределение на бентосната флора и фауна, както и за планиране и управление на биологични и минерални ресурси и

различен тип инженерни дейности на морското дъно, е необходимо прилагането на иновативни методи на проучване с възможност за едро мащабно детайлизиране на наличната информация. Настоящият доклад е фокусиран върху създаването на интегрална гео-база данни, с цел комплексна интерпретация на данни от съвременни изследвания с модерни технологии и фондови материали за района на Авренското крайбрежие, между н. Галата и н. Иланджик.

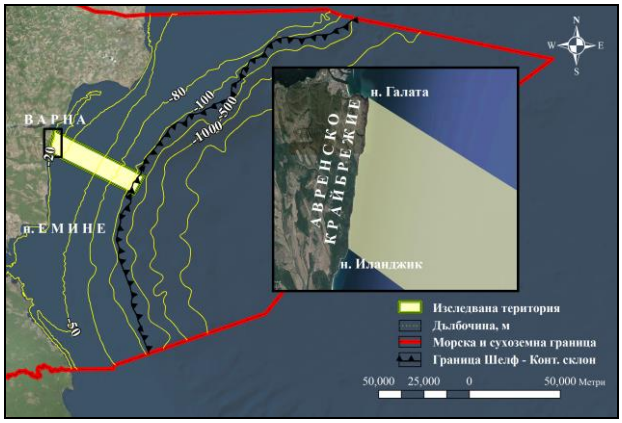
Регионални изследвания в Българския континентален шелф

Развитието на българската морска наука е пряко повлияна от руската, като след 50-те години на XX-ти век регионалните изследвания на Българския континентален шелф (БКШ) са предимно съвместно със съветско участие (Отчетен доклад, 1987; Геология …, 1979; Геолого-геофизические …, 1980; Нефте-газогенетические …, 1984; Геологическая …, 1990). Основополагащи за тектонската регионализация на българския континентален шелф (БКШ) са изследванията на Глумов (1971), Велчев (1971), Гончаров и др. (1972), Головинский и др. (1976); Головинский и Глумов (1975) и други. Изводът от тях е, че основните геоложки структури от сушата продължават и на шелфа (Дачев, 1977; Крыстев и Михова, 1990; Кръстев, 1993; Генов, 1996; Димитров, 2003; Пейчев и Димитров, 2012). БКШ в геоморфоложки аспект е изучаван детайлно преди 1990 г. съвместно от български и съветски екипи (Федоров, 1963; Лилиенберг и др., 1964; Лилиенберг, 1966, 1970; Пърличев и Марков, 1971, 1972; Пърличев и Петров, 1974; Сорокин и др., 1980; Куприн и др., 1980; Попов и Мишев, 1984; Чочов, 1984; Khrishev & Shopov, 1978; Михова, 1989; Крыстев и Михова, 1990). В структурно-геоморфоложко отношение българският шелф е развит върху морското продължение на хетерогенни, хетерохронни и разнопорядкови морфотектонски елементи: Дунавската епиплатформенна равнина, Долнокамчийското структурно понижение, Източно-Старопланинската нагъната зона, Бургаската междупланинска депресия и Странджанския антиклинорий. Крупните елементи на релефа, които се отделят в Българския сектор на Черно море са: шелф, континентален склон, континентално подножие и абисално дъно (Пърличев, 1976; Отчетен доклад, 1978; Геология…, 1979).

В резултат на анализ на наличната литературна информация се налага изводът, че регионалният характер на изследванията е приключил и е подходящ само за обща характеристика на района и дребно мащабни картни построения. Този етап е завършил в началото на настоящия век.

Район на изследване

За район на изследване е избрана акваторията между нос Галата (на север) и нос Иланджик (на юг), в дълбочина до границата континентален шелф - склон. Географски, районът е част от Северното Българско Черноморие. Дължината на бреговата линия е около 14 km. Мористо направлението е северозапад-югоизток и е с дължина от 52 km. Най-източната част на района е границата между шелфа и континенталния склон, дефинирана пред Авренското крайбрежие на 130 m дълбочина (Проданов и Димитров, 2015). Изследваният участък обхваща площ с размер приблизително 650 km^2 (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема на местоположението на изследвания район

Изборът на района се базира на достъпни материали от съвременни проучвания, проведени след 2000-та година (Пейчев и Андреева, 1998; Керемедчиев и Пейчев, 2001; Керемедчиев, 2004; Dimitrov & Kojuharov, 2007; Кожухаров и кол., 2010; Geotechnical works..., 2011; Пейчев и Димитров, 2012; Коцев и Керемедчиев, 2012; Marine Seabed…, 2013; Marine Ecology…, 2013; Prodanov et al., 2013; Станчев и кол., 2014; Трифонова и кол., 2014; Prodanov et al., 2014; Коцев, 2014; Hristova, 2015; Христова, 2015; Проданов и Димитров, 2015, 2015a; Todorova et al., 2015). Те широко застъпват морската и брегова морфология, литологията, литостратиграфията на шелфа и картирането на подводни физически местообитания.

Използвани данни

За изготвянето на интегралната гео-база данни, освен архивни данни от фонда на Институт по океанология, са използвани и първични данни от еднолъчево ехолотиране, картиране с многолъчева сонарна система (МСС) Seabat'7111 с 100% покритие, заснемане с локатор за страничен обзор и седиментен профилограф.

През 2007 г., във връзка с проектирането и експлоатацията на блок „Калиакра 99“ от Melrose Resources, е извършено комплексно изследване на морското дъно, включващо анализ на седимента, батиметрично картиране и измерване на солеността и температурата. Чрез гравитачно сондиране са взети 10 проби, а акваторията е картирана с Ехолот SIMRAD EA 200 и странично - сканиращ сонар Klein-3000 (Dimitrov & Kojuharov, 2007). Във връзка с оценка на въздействието на проекта „Южен поток“ върху морската флора и фауна при района на Паша дере, в Изключителната Икономическа Зона (ИИЗ), е извършено пробонабиране с дъночерпател в 75 точки, подводно видеозаснимане, картиране с многолъчева сонарна система и вибро- и гравитачно сондиране,

съответно в 17 и 35 точки (Geotechnical works..., 2011; Marine Seabed…, 2013; Marine Ecology…, 2013).

През 2013 г. МОСВ на Република България възлага на ИО-БАН изготвянето на „Доклад оценка на екологичното състояние на морските води (РДВ)“. Извършено е батиметрично заснимане с еднолъчев ехолот на крайбрежните морски води на Република България. (Станчев и кол., 2014). Успоредно с батиметричното заснимане, друга от задачите е актуализиране на картата на дънните субстрати на крайбрежните води на Р. България (Трифонова и кол., 2014). За обновяването на съществуващите литоложки карти, през ноември 2013 г. е извършено пробонабиране с грайфер „Van Veen” в мрежа от 359 точки по цялото крайбрежие, като 51 от тях попадат в района на изследване, между н. Галата и н. Иланджик

През 2014 г. Центърът за подводна археология, гр. Созопол, провежда комплексно картиране на дъното в района на Паша дере с цел установяване влиянието на строителните работи по проекта за транс-черноморски газопровод „Южен поток“ върху културно-историческото наследство на Р. България. Данните, получени от използвания апаратурен комплекс (еднолъчев ехолот BBT ES Flamingo R100DGR, многолъчев ехолот MB1 Teledyne Odom Hydrographic, странично-сканиращ сонар Side Scann Sonar „StarFish 450H“, придънен профилограф „Sub-bottom profiler SES-2000“, система за позициониране DGPS, Trimble SPSx61), съчетан с три археоложки сондажа, дават възможност за по-детайлен анализ.

За нуждите на интегралната гео-база данни са използвани различни по тип изходни графични данни, които включват ортофото и сателитни изображения, разномащабни сканирани карти, картосхеми и планове, ГИС слоеве, цифрови модели на височините, батиметрични контури и други.

Пост-обработка на използваните данни

Изходните данни от приборите за картиране се състоят от различна по вид информация (сонарна, навигационна, батиметрична, телеметрична) в *.XTF (Extended Triton Format) формат. Според характера на измервателната техника и пост-обработката е различна. При многолъчевата сонарна система (Multibeam Echosounder System SeaBat 7111) е използван софтуер PDS2000. За странично-сканиращия сонар Klein 3000 са приложени програмните продукти Sonar Pro и SonarWizMAP-4.

За дефинирането на литоложката основа са използвани 189 геоложки станции. От тях 109 са седиментоложки, анализирани в *Лабораторията по литодинамика към Институт по океанология* и *Biokor kfl (Унгария).* След анализ на резултатите от анализите е установени разминаване в класификационните системи, което налага и унифицирането на седимента в различни системи. В резултат на унифицирането чрез софтуера „Gradistat Program” (Blott and Pye, 2001), всички 189 геоложки станции са категоризирани според класификационните схеми на Gradistat (Blott and Pye, 2001), модифицирана от Wentworth size class scheme (Wentworth, 1922), Folk (Folk, 1954, 1974) и БДС676 от 1985 г.

Интегрална гео-база данни

Интегралната гео-база данни представлява комплект от данни за геоложката основа на шелфа пред Авренското крайбрежие. Данните са поделени в два основни типа: растерни и векторни.

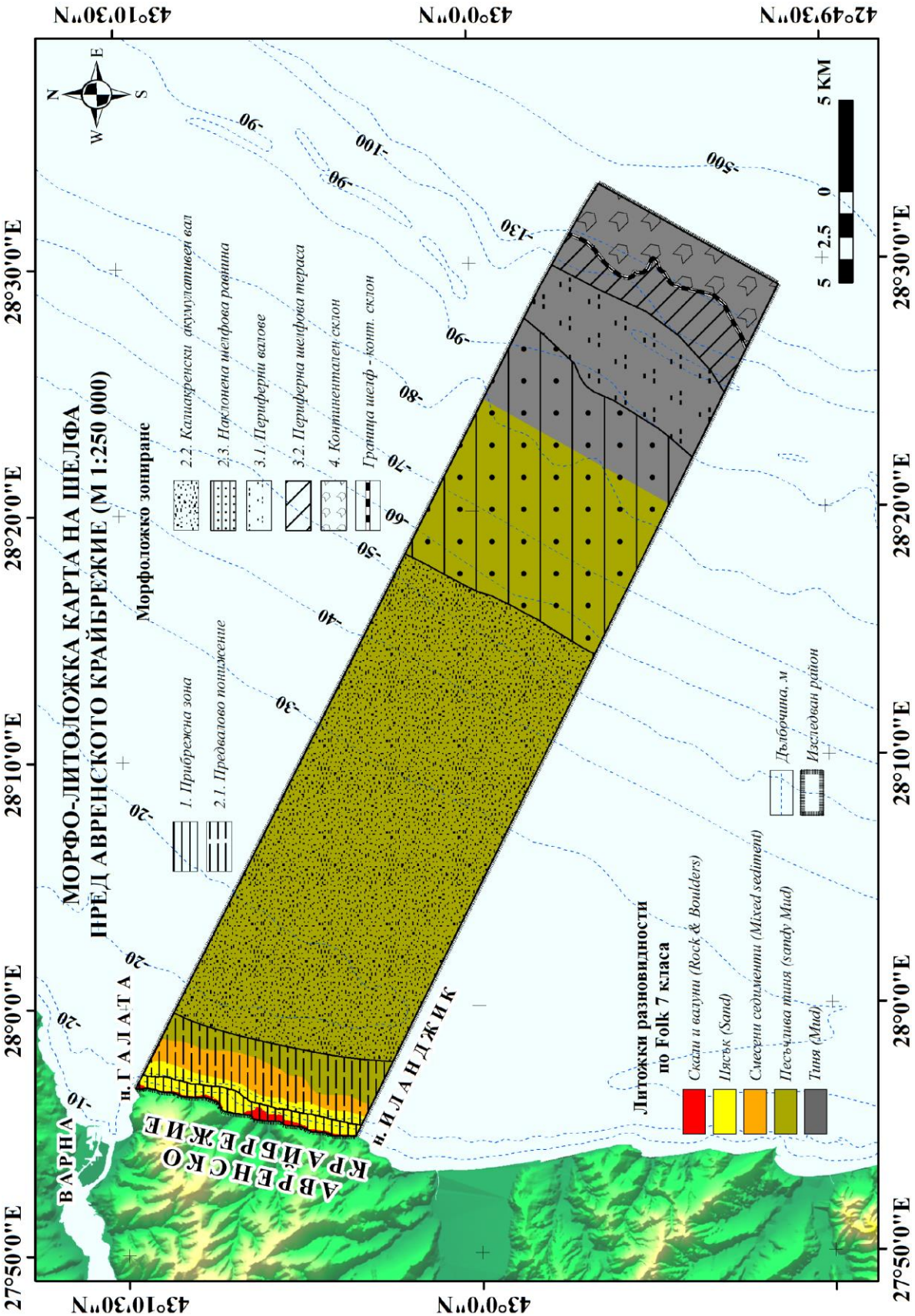
В *растерните* влизат: сонарна мозайка на дъното с висока резолюция; 16 сателитни изображения от Google Earth, покриващи сухоземната част между н. Галата и н. Палеца; 3 сканирани топографски карти на местността, компилирани през 80-те години на XX-ти век; сканирана морфолито-стратиграфска карта на бреговата зона между н. Галата и н. Палеца; сканирана геолого-тектонска карта на бреговата зона между н. Галата и н. Палеца; сканирана геоморфоложка карта на бреговата зона между н. Галата и н. Палеца, сканирана батиметрична карта на българския сектор от Черно море, Геоложка карта на българския сектор от акваторията на Черно море. Изброеният комплект от данни е приведен в единна картна проекция UTM зона 35N с геодезичен датум WGS 84.

Векторният тип данни е продуциран предимно след дигитализиране на наличните растерни материали. За изследвания район са създадени два цифрови модели на релефа на дъното с хоризонтална резолюция от 2 и 20 m. От теренните модели са извлечени батиметрични контури през 0,5 m. Окунтурени са скалните образувания в бреговата зона. По ортофото изображения е изчертана високо точна водна линия за проследяване на формите на релефа по брега. Различната отразяваща способност на дъното е използвана при оконтуряването на разновидностите по физически характеристики. Както при растерите, така и при векторните данни, е използвана картната проекция UTM 35N с геодезичен датум WGS 84. Болшинството данни са във векторен тип формат (*.SHP - Shapefile shape format), подходящ за употреба от широк спектър ГИС базирани програмни продукти.

Интерпретация и резултати

Създадената интегрална гео-база позволява комплексен геопространствен анализ на морфоложките и литоложки условия на шелфа и изготвяне на различни по вид карти: геоморфоложки, морфоложки, литоложки. Унифицираните данни от седиментоложките анализи позволяват прилагането им в различни класификационни системи.

На базата на генерираните високо резолюционни теренни модели на релефа, сонарните мозайки на дъното и седиментоложки анализираните геоложки станции, е построена *Морфо-литоложка карта на шелфа пред Авренското крайбрежие* (фиг. 2). Отразени са двата аспекта (морфология и литология), характеризиращи геоложките условия на шелфа в повърхностния холоценски слой. Проследени са границите на морфоложките форми на релефа от втори ранг в рамките на континенталния шелф: прибрежна зона, предвалово понижение, Калиакренски акумулативен вал, наклонена шелфова равнина, периферни валове, периферна шелфова тераса и границата шелф – континентален склон, разположена приблизително по изобата 130 m. Най-



Фиг. 2. Морфо-литоложка картна в мащаб 1:250 000 на шелфа пред Авренското крайбрежие

удобната литоложка класификация на дънните седименти, при настоящия мащаб на картографиране, е Folk 7 класа (Folk, 1954, 1974). На континенталния шелф пред Авренското крайбрежие се отделят 5 класа субстрат: скали и валуни *(Rock & Boulders)*, пясък *(Sand),* смесени седименти *(Mixed sediment),* песъчлива тиня *(sandy Mud)* и тиня *(Mud).*

Анализът на данните за поддънния строеж на шелфа и литологията в прибрежната зона са в процес на изготвяне и поради конфиденциалност на информацията не могат да бъдат представени към момента в настоящата работа.

Изводи и заключения

В резултат на проведеното изследване и задълбочения анализ на литературните и фондови материали, са постигнати следните резултати:

1. Изготвена е интегрална гео-база данни за комплексен геопространствен анализ на морфоложките и литоложки условия на шелфа пред Авренското крайбрежие;
2. Генерирани са два цифрови модели на релефа на дъното с хоризонтална резолюция от 2 и 20 m и са построени батиметрични карти със стъпка 0,5 m за целите на геоложкото проучване;
3. Унифицирани са 189 геоложки станции в световно широко приети класификационни системи (Folk, Wentworth и Gradistat);
4. Изготвена е *Морфо-литоложка карта на шелфа пред Авренското крайбрежие в мащаб 1:250 000* по Folk 7 класа.

Благодарности. Авторите изказват благодарност на Българска академия на науките за финансирането на настоящия доклад по проект *„Създаване на интегрална база данни в ГИС среда за морското дъно пред Авренското крайбрежие“* по *„Програма за подпомагане на младите учени в БАН“.*

Литература

Велчев, Цв. Некоторые черты геологическое строение черноморского шельфа Народной республики Болгарии. - *Acta Geol. Akad. Scion. Hung.,* v.5, 1971. -365-368.

Генов, И. *Генезис на субмаринните газови източници в плитководието на Черно море във връзка с оценката на нефтогазоносната перспективност.* Дисертация за придобиване на образователна и научна степен „Доктор", Институт по океанология, Варна, 1996, - 165 с.

Глумов, И. Геологическое строение Черноморского шельфа НР Болгарии. – *Докл. БАН*, .2, 1971, - 255-258.

Головинский, В., И. Глумов. Геологическое строение черноморского шельфа Болгарии. В: *Комплексные исследования Черноморской впадины*, М., Наука, 1976. - 33-35.

Головинский, И., И. Глумов, Хр. Дачев. Перспективы нефтегазоностности шельфа Народной Республики Болгарии. - *Геология нефти и газа.* М., Наука, 1975. - 33-35.

Гончаров, В., Ю. Непрочнов, А. Непрочнова. *Рельеф дна и глубинное строение Черноморской впадины*, М., Наука, 1972. -160 с.

Дачев, Хр. Продължение геологических структур Балканского п-ова в Черном море. - *Geol. Balk.,* 7, 4, 1977. -95-106.

Димитров, Л. *Плитко залягащи газонаситени утайки и газопроявления на българския континентален шелф.* Дисертация за присъждане на научна степен „доктор". В., Фонд на ИО-БАН, 2003. - 176 с.

Керемедчиев, Ст. Геоморфоложки анализ на бреговата зона на Авренското крайбрежие. В *Проблеми на географията,* 3-4, С., БАН, 2004. - 126-134.

Керемедчиев, Ст., В., Пейчев. Съвременна геоморфодинамична активност и устойчивост на бреговия склон между н. Галата и Сакъма дере. - *Изв. на Съюза на учените - гр. Варна,* кн. I и II (2000/2001), 2001. - 67-71.

Коцев, И. *Структура, динамика и райониране на ландшафтите в Черноморската крайбрежна зона между нос Калиакра и нос Емине.* Дисертация за придобиване на образователна и научна степен „Доктор", Институт по океанология, Варна, 2014. - 303 с.

Коцев, И., Ст., Керемедчиев. Съвременна ландшафтна структура на подводния брегови склон пред плаж Паша дере (Авренска брегова зона, Българско Черноморско крайбрежие). - *Научни трудове на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров"*, 30, ISSN 1312-0867, 2012. - 103-106.

Кръстев, Т. *Структурно-геоморфоложко развитие на континенталната окрайнина на Българския сектор на Черно море*, Автореферат на дисертация за доктор на геогр. науки, 1993. - 64 с.

Крыстев, Т., Е. Михова. Релеф и тектоника на българския шелф. - В: *Крыстев, Т. (ред.). Геологическая эволюция западной части Черноморской котловины в неоген-четвертичное время,* С., БАН, 1990. - 392-431.

Куприн, И., В. Сорокин, П. Димитров. Основные расчленения и типы разрезов позднечетвертичных осадков континентальной террасы. В: *Геолого-геофизические исследования болгарского сектора Черного моря*. С., БАН, 1980. - 188-202.

Лилиенберг, Д. Основные черты геоморфологии и палеогеографии югозападного побережья Черного моря. Комплексные исследования Черноморской впадины. - *сп. Наука,* 1970. - 82-114.

Лилиенберг, Д., К. Мишев, В. Попов. Новые данные о черноморских терассах Странджeнского побережия Болгарии. - *Докл. АН СССР*, 159, 3, 1964. - 943-967.

Михова, Е. Ландшафтни изследвания на българския шелф от н. Калиакра до н. Галата. - *Проблеми на географията,* том 4, 1989. - 18-25.

Пейчев, В., Н. Андреева. Райониране на Българското черноморско крайбрежие по морфодинамични системи.- *Сб. „Брегоукрепване и дълготрайно стаилизиране на склоновете на Черноморското крайбрежие“*, АИ „Проф. Марин Дринов", С,1998. - 85-90.

Пейчев, В., В. Димитров. *Океанология,* Варна, Изд. Онгъл, 2012. - 376-401.

Попов, Вл., К. Мишев. *Геоморфология на крайбрежието*. С., Изд. на БАН, 1984. - 52-209.

Проданов, Б., Л. Димитров. Морфо-литоложка характеристика на шелфа пред Авренското крайбрежие. – *Год. на Минно-геоложкия университет „Св. Ив. Рилски“*, т. 58, Св. I, Геол. и геофизика, 2015. - 73-78.

Проданов, Б., Л. Димитров. Приложение на многолъчеви сонарни системи в геоложкото картиране на дънните седименти в крайбрежната зона пред плаж Паша дере,

Северно Българско Черноморие. – *Год. на Минно-геоложкия университет „Св. Ив. Рилски“,* т.58, Св.I, Геол. и геофизика, 2015а. - 67-72.

Пърличев, Д. Неотектонски проблеми на българския Черноморски шелф. - *Океанология*, т.1,. БАН, 1976. - 81-92.

Пърличев, Д., Хр. Марков. Депресия на дъното край българския бряг на Черно море. - *Природа,* 2, БАН, 1971. - 31-35.

Пърличев, Д., Хр. Марков. Релефът на дъното пред българския черноморски бряг. - *Природа*, 3, БАН, 1972. - 28-32.

Пърличев, Д., П. Петров. Опит за геоморфоложко райониране на Българския черноморски шелф. - *Проблеми на географията в България*, т. IV, 1974. - 69-80.

Сорокин, М. Состав и условия формирования позднечетвертичных осадков западной части Черного моря. - В: *Изучение геологической истории и процессов современного осадкообразования Черного и Балтийского морей.* Част. 1. Киев, Наукова думка, 1984. - 89-96.

Сорокин, М., П. Димитров, В. Лушка. Типы позднечетвертичных осадков на континентальной террасе. – В: *Геолого-геофизические исследования болгарского сектора Черного моря.* С, БАН, 1980. - 230-237.

Федоров, П. *Стратиграфия четвертичных отложений Крымско-Кавказкого побережья и некоторые вопросы геологической истории Черного моря*, М., 1963. -159 с.

Христова, Р. *Българският черноморски шелф и крайбрежие през кватернера - геоложка еволюция и климатични промени.* С., Университетско издателство „Св. Климент Охридски”, 2015. - 126 с.

Чочов, Д. Роль поверхностных течений в процессах осадкообразования на болгарском черноморском шельфе. – В: *Изучение геологической истории и процессов современного осадкообразования Черного и Балтийского мерей.* Киев, Част 2, Наукова думка, 1984. - 92-99.

Blott, S., K. Pye. Technical communication: GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. - *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 2001. - 1237-1248.

Folk, R. The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. - Journal of Geology, v.62, 1954. - 344–359.

Folk, R. *Petrology of sedimentary rocks*, Austin, Tex., Hemphill Publishing Co., 1974. - 182 p.

Hristova, R. Lithostratigraphic and spatial relationship of the Upper Quaternary sediments on the boundary shelf-continental slope in the Bulgarian sector of the Black Sea. – *Докл. БАН*, т.68, №3, 2015. - 351-358.

Khrishev, Kh., V. Shopov. Quaternary stratigraphy of the outer South Bulgarian Black Sea shelf. - *Geologies Balcanica*, 8, 1978, № 2, 1978. - 21-40.

Marine ecology. – In: *South Stream Gas Pipeline Project Surveys Report, Environmental Impact Assessment,* 2013. - 203 p.

Marine Seabed Habitat Baseline Study. - In: *South Stream Gas Pipeline Project Surveys Report, Environmental Impact Assessment,* 2013. - 47 p.

Prodanov, B., I. Kotsev, St. Keremedchiev, V. Todorova, L. Dimitrov. Initial assessment of the technogenic pressure in the mediolittoral zone of the Bulgarian Black Sea coast. - In: *Proceedings of the Second European SCGIS conference "Conservation of Natural and Cultural Heritage for Sustainable Development: GIS-based Approach ",* Sofia, 2013. - 4-13.

Prodanov, B., I. Kotsev, L. Dimitrov. Seascape-based Modeling of Benthic Habitats Spatial Distribution. Case Study: Avren Plateau Sublittoral Zone, Bulgarian Black. – In: Proc. 12th Int. Conference on Marine Science and Technology "Black Sea", ISSN 1314-0958, Varna, 2014, - 175-182.

Todorova, V., L., Dimitrov, V., Doncheva, E., Trifonova, B., Prodanov. Benthic Habitat Mapping in the Bulgarian Black Sea. - In: *Proceedings of 12th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 2015),* vol. 1, Varna, 97-605-85652-4-1, 2015. - 251-262.

Wentworth, C. A scale of grade and class terms for clastic sediments. - *Journal of Geology, 30*, 1922. - 377–392.

Фондови материали:

Геологическая эволюция западной части Черноморской котловины в неоген-четвертичное время. - Сб. Доклади, С., БАН, 1990. - 666 с.

Геология и гидрология западной части Черного моря. С., БАН, 1979. - 143 с.

Геолого-геофизические исследования Болгарского сектора Черного моря. С., БАН, 1980. - 318 с.

Кожухаров, Е., Л. Димитров, Р. Христова, В. Дончева. Обяснителна записка. - В: *Геоложка карта на българския сектор от акваторията на Черно море в мащаб 1: 500 000.* В., Научен фонд на ИО-БАН, 2010. - 65 с .

Нефте-газогенетические исследования Болгарского сектора Черного моря. С., БАН, 1984. - 288 с.

Отчетен доклад. Изследване геоморфоложкия строеж, литодинамиката и четвъртичните отложения на бреговата и шелфова зона на Българското Черномоморие от н. Калиакра до н. Емине. В., Научен фонд на ИО-БАН, 1987. - 570 с.

Трифонова, Е., Ст. Керемедчиев, И. Коцев. Седименти. – В: *Доклад оценка на екологичното състояние на морските води (РДВ).* Договор № 0-33-18 / 12.06.2013, В., Научен фонд на ИО-БАН, 2014.- 43-76.

Станчев, Хр., Ил. Щирков, В. Панайотов, Я. Веков, Л. Димитров, В. Дончева, Е. Борисова, Б. Проданов, А. Апостолов, О. Янев, П. Петров. Батиметрия. – В: *Доклад оценка на екологичното състояние на морските води (РДВ).* Договор № 0-33-18 / 12.06.2013, Научен фонд на ИО-БАН, 2014. - 6-41.

Geotechnical works at shelf and abyssal area of Anapa - Varna (with DP). - In: *Engineering-geological survey (South Stream Gas Pipeline Project Survey),* 2011. - 238 p.

Dimitrov, L., E. Kojuharov, V. Tasev, R. Hristova, A. Vasilev, I. Shtirkov, L. Doichev, Ts. Sirakov, O. Teoharov, O. Apastolov, E. Kutsarov. Surface Geology. – In: *Site Survey Report on proposed drilling location*, Institut of oceanology, Varna, Bulgaria, 2007. -16 p.

Статията е рецензирана от доц. д-р Стян Керемедчиев и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и геоинформатика”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

CHARACTERIZATION OF ZEOLITIC TUFF FROM NORTHEAST JORDAN USING BOREHOLES DATA

Khalid Tarawneh[1], Ibrahim Rabba[2], Mohammad Nawasreh[3], Khalil Ibrahim[4], Hani Al Nawafleh[5]

[1] Isra University, Faculty of Engineering, Civil Department, Amman-Jordan
[2] Ministry of Energy and Mineral Resources, Amman-Jordan
[3] University of Hail, Saudi Arabia
[4] Hashemite University, Faculty of natural Resources and Environment, Zarqa-Jordan
[5] Al Hussein Bin Talal University, Faculty of Engineering, Mining Department, Ma'an-Jordan

ABSTRACT. Zeolite, the hydrate tectosilicate minerals, composed of various minerals such as phillipsite, chabazite, faujasite and analcime. Zeolites have been used for many applications such as drying and purification. Zeolites are distributed throughout Jordan in volcaniclastic and tuff volcanic centers. Several zeolitic deposits were located in northeast areas, mainly in Al-Aritayn, Tlul Al-Shahba, Jibal Hmelan, Tal Rimah, Tell Hasna and other places. These deposits are associated with the Harrat-Asham volcanic activity. The zeolitic tuff is composed of different assemblages of minerals such as phillipsite, faujasite, chabazite and analcime with high amount of iron oxide as hematite, fresh sideromelane, palagonite and smectite. They can be associated mainly with the black and red scoria. For the purpose of this study many boreholes have been drilled for examination of main characteristics of the zeolitic tuff, with aim to get a better understanding about vertical and lateral distribution of these minerals below the surface. To achieved that, many samples from different boreholes have been investigated using XRF, XRD and thin sections. The results revealed huge reserves that can be approved for future detailed exploration and extraction. The Jordanian zeolites are considered to have many important applications such as: ion-exchange (water softening and purification), and in the separation and removal of gases and solvents, in agriculture, and in animal husbandry.

Keywords: Jordan, zeolites, tuff, deposits, reserves.

CHARACTERIZATION OF ZEOLITIC TUFF FROM NORTHEAST JORDAN USING BOREHOLES DATA
Khalid Tarawneh[1], Ibrahim,Rabba[2], Mohammad Nawasreh[3], Khalil Ibrahim[4],Hani Al Nawafleh[5]
[1]Isra University, Faculty of Engineering, Civil Department, Amman-Jordan
[2]Ministry of Energy and Mineral Resources, Amman-Jordan
[3]University of Hail, Saudi Arabia
[4]Hashemite University, Faculty of natural Resources and Environment, Zarqa-Jordan
[5]Al Hussein Bin Talal University, Faculty of Engineering, Mining Department, Ma'an-Jordan

Abstract. Zeolite , the hydrate tectosilicate minerals, composed of various minerals such as phillipsite, chabazite, faujasite and analcime. Zeolites have been used for many applications such as drying and purification. Zeolites are distributed throughout Jordan in volcaniclastic and tuff volcanic centers. Several zeolitic deposits were located in northeast areas, mainly in Al-Aritayn, Tlul Al-Shahba, Jibal Hmelan, Tal Rimah, Tell Hasna and other places. These deposits are associated with the Harrat-Asham volcanic activity. The zeolitic tuff is composed of different assemblages of minerals such as phillipsite, faujasite, chabazite and analcime with high amount of iron oxide as hematite, fresh sideromelane, palagonite and smectite. They can be associated mainly with the black and red scoria. For the purpose of this study many boreholes have been drilled for examination of main characteristics of the zeolitic tuff, with aim to get a better understanding about vertical and lateral distribution of these minerals below the surface. To achieved that, many samples from different boreholes have been investigated using XRF, XRD and thin sections. The results revealed huge reserves that can be approved for future detailed exploration and extraction. The Jordanian zeolites are considered to have many important applications such as: ion-exchange (water softening and purification), and in the separation and removal of gases and solvents, in agriculture, and in animal husbandry.

Keywords: Jordan, zeolites, tuff, deposits, reserves.

Introduction

The new occurrences of the zeolitic tuff deposits are belong to the Cenozoic continental basaltic rocks exposed in northeast Jordan (Fig. 1). Detailed geological mapping of the northeast Jordan was carried out by the Natural Resources Authority since 1988, which allowed to produce several geological maps of 1:50,000, 1:25.000 and 1:250.000. Ibrahim (1993) studied in detail the basaltic province, redefined and subdivided the exposed volcanics of the Harrat Ash Shaam Basaltic Super-Group into five groups: Wisad, Safawi, Asfar, Rimah and Bishriyya. Based on new K-Ar dating of the basalt Tarawneh et al. (2000, 2002), subdivided the Harrat Ash Shaam Basaltic Super- Group into three major phases. The first phase is of Oligocene age 26.0-21.0 Ma. The second phase is of late Miocene (12-8Ma) and the third phase is mostly of Pliocene –

Quaternary (6-<0.5Ma). Authigenic zeolites were first discovered and reported in the Aritayn Formation of northeast Jordan by Dwairi (1987); followed by Malabeh (1993); and Ibrahim (1996; 2004). New occurrences in northeast, central and south Jordan were later reported by Ghrir (1998); Rabba and Tarawneh (2001); Tarawneh (2003 and 2004); Al Dwairi and Sharadqah (2014) and Khuori et al., (2015). This research aims to study the spatial distribution of the new zeolitic tuff occurrences, investigate their mineralogy and chemistry and to understand the vertical and lateral distribution of the zeolite minerals regarding the data from 26 log which were drilled at four localities at Tlul Shahba Sheet/northeast Jordan (Fig. 1). For the exploration of zeolitic tuff the area was subdivided into four localities as the following:

A) The first locality (Mount Hamlan) lies about 12 km from the main road Safawi - Ruwaished within the coordinates: 1204-1207 N and 390-392 E.
B) The second locality is located to the south of the first locality with coordinates: 1201-1202.5 N and 390-392.5 E.
C) The third locality (Tlul Hasna) is located of about 3.5 km, north of the Ashgaf area within the coordinates: 1201-1202.5 N and 394.5-396.5 E.
D) The fourth locality located northwest of the south Ashgaf and lies with coordinates: 1187-1188 N and 395-396.5 E.

The elevation of these localities ranges between 896-988 m ASL, and include volcanic hills of medium height, which are covered by basaltic flows intercalated with different types of pyroclastic materials. Soil is scattered throughout the area with many mudflats sediments. The area is accessible and very optimistic for future exploration and extraction of the ore deposits.

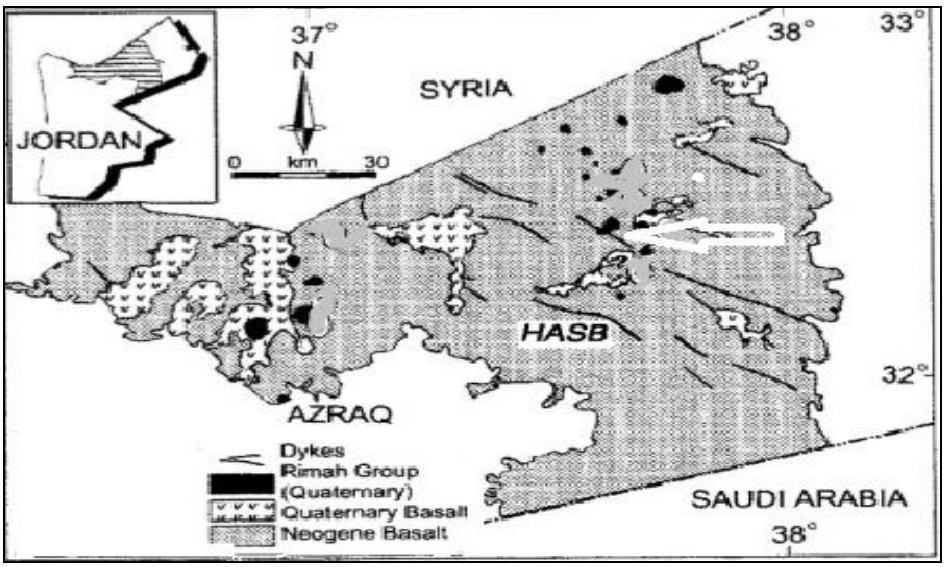


Fig. 1. Simplified geological map of northeast Jordan, arrow showing the sample localities, modified after Ibrahim (2004)

Methodology

Field work

Field work was carried out in the north-eastern regions of the Kingdom for the last years, and it is represented by preparing of geological maps, with scale 1:250.000, 1:50.000 and 1:25.000, companied with petrographic studies, geochemical studies, mineral processing of the ores, and age dating of volcanic rocks. Many samples were collected from several sites. Based on the results of these samples, representative areas were selected for drilling at four localities for zeolitic tuff exploration.

Drilling Program

Exploration program was carried out by field studies and inspections of samples that indicate the presence of zeolite minerals, which are belong to volcanic tuff in the study area. To cover the whole area and to show the distribution of the zeolite minerals and the depth of zeolitic tuff beneath the surface, the exploration program was carried out by drilling of wells and opening of trenches at four localities. For this exploration program 26 wells were drilled at four sites. The depths of the logs ranged from 3 to 26 meters (Table 1). Total meters that were drilled reached up to 274 m. Most of the excavated core samples have good yield ratios (fig. 3 A,B).

Analytical Methods

More than 100 samples from boreholes and outcrops were examined by petrographic studies using polarizing microscope, X-ray diffraction and XRF analysis. Some samples also were observed by scanning electron microscope (SEM).

Results and Discussion

Detailed field investigation indicated the presence of the vertical and lateral zonation with respect to the degree of alteration of sideromelane to a reddish-brown colours palagonite with very distinguish zoning in depth at all localities. This zoning was described by Ibrahim (1996) in many localities at northeast Jordan. It displays distinctive yellowish light brown, reddish and black colours. The highly zeolitized areas contain soft and friable highly altered lapilli clasts cemented by coating of zeolite and calcite. In many cases, zeolite minerals

filled the cavities between particles of scoria and volcanic tuff. The exposed thickness of the zeolitic zone ranges from 1 m to 20 m, while from the boreholes data it reaches up to 26m beneath the surface. The contact between zones are sharp and affected by the topography and structure of the area that has been cut by faults and dikes. Diagenesis involves palagonitization of sideromelane and the formation of authigenic minerals including zeolites and calcite. The amount of the former is generally proportional to the amount of palagonite in the volcanic tuff (Hay and Iijima, 1968).

Petrogrphic and Mineralogical studies

More than 100 samples of the zeolitic tuff were studied through polarizing microscope and XRD. It can be argued that the zeolitic tuff composed of assemblages of minerals that can be subdivided into zeolite minerals (phillipsite, chabazite, faujasite and analcime), volcanic glass (palagonite and sideromelane), associated with calcite, Fe-Ti oxides, xenolithes and phenocrysts of olivine, pyroxene (ortho- clinopyroxene) and spinel (fig. 4A).

Phillipsite occurs mainly as colourless, radiating crystal aggregates forming a thin rim on pyroclasts. It is also present as isolated euhedral prisms or as rosettes of radiating and spherulitic crystal form. Crystals are commonly less than 50µm long and rarely as long as 300µm (fig. 4B).

Chabazite occurs in transparent, isolated or clustered, equant, rhombic, crystals with a rhombohedral cleavage, simple penetration twining and zoning. Crystals vary in grain size from several microns up to 300 µm (fig. 4C).

Faujasite is discovered by Ibrahim and Hall (1995). It occurs in colourless, equant, isotropic, isolated and aggregated crystals between 50 µm and 100 µm, grows directly on the vesicle walls or sometimes preceded by the smectite phase.

Analcime is very rare in the studied samples from boreholes and is identified by X-ray diffraction in some wells. It comes as euhedral well-formed crystals typical with trapezohedral form with size up to 150 µm.

Smectite is present filling the cavities and voids and it occurs in the form of undulated flakes. Smectite crystals range in size between 0.2µm and 2 µm. with an average size of about 0.5 µm. Smectite form the earliest alteration product of the authigenic minerals. It appears as cloudy very thin rim fringing palagonite clasts and/or the vesicle walls (khoury, et al., 2015).

Calcite which represents the latest phase of authigenic minerals, occurs in the form of rim and blocky cement, filling central parts of vesicles and the intergranular space. Ibrahim and Hall (1995) indicated that authigenic minerals were deposited in the same sequence.

The volcanic tephra comprises massive, poorly cemented lapilli vitric tuff to coarse vitric ash tuff. The cementing material consist essentially of zeolite and calcite. In addition to fresh and palagonitized sideromelane clasts, the tuff contains lesser amounts of crystal of olivine, ortho- and clinopyroxene and spinel. The lithic clasts consist of the following types: vesicular, brown to dark brown, microcrystalline, olivine phyric basalt, and pyroxene olivine phyric basalt; upper crustal inclusions including sandstone, limestone, quartzite, argillite, chert, phosphorite and ultramafic xenoliths including all the spectrum of both the (spinel) peridotite and (spinel) pyroxenite, in addition to garnet pyroxenite and pyroxenite (enstatite) (Tarawneh and Abu Jassar, 1994).

Sideromelane comprises greenish light brown, hypohyaline, texturally uniform and smooth groundmass with fresh olivine phenocrysts or needles. Vesicles and voids are mostly rounded, but with different sizes and coated or filling by calcite or zeolites.

Palagonite is made of a groundmass of reddish brown to yellowish brown and golden red hydrated sideromelane with distinctive hydration polygonal cracks. The palagonite occurs either as smooth or mottled consists of tiny (less than 1 mm) massive, yellow-brown, isotropic ooidal spherulites. The palagonite granules and the vesicles inside always exhibit a darker colored mantle zone of palagonite, named by Dwairi (1987) as rim zone palagonite. Authigenic minerals usually coat both the granules and the vesicles. The chemical composition of palagonite, is rather variable and reflects the degree of the palagonitization. It was noticed by many authors that Fe and Ti content in the palagonite is proportional to the degree of the palagonitization of the sideromelane (Ibrahim, 1996). Lateral and vertical variation can be traced in most of the boreholes and this could be related to the degree of zeolitic processes and the rate of the transformation of the volcanic glass to zeolite minerals. This process is well described according to Ibrahim and Hall (1996) to the order of paragenesis of the principal authigenic minerals in the Aritayn Volcaniclastic is as follows:-

Fresh sideromelane →palagonite →Mg-clay → faujasite → phillipsite → chabazite → calcite.

XRD Results

For XRD methods, standard sample of 175.5 g from zeolitic tuff was prepared through grain size analysis (Table 1), XRD and point counting method using stereomicroscopic was used, with aim to identifies the percentage of zeolite minerals and other associated minerals (Table 1).

From the results of grain size destribution, it can be concluded that the zeolite minerals can be found in all grain size with different content. The point counting method indicated that the percent of the zeolite minerals ranges between 15 to 50.00%, while by XRD method indicated that the percent of the zeolite minerals ranges between 43.21 and 51.77% as shown in Table 1.

Table 1.
Grain size distribution of the zeolitic tuff from Mount Hamlan

Sample No.	Grain Size µm	Total wt (gm)	Zeolites, % counting	Calcite % XRD	Zeolites % XRD
PZ1	600	48.3	20-50	7.13	51.77
PZ2	500	35.7	15-50	7.26	46.55
PZ3	150	31.4	20-50	5.30	47.81
PZ4	75	32.9	30-50	9.97	43.21
PZ5	pan	24.5	–	5.17	45.02

More than 88 sample were analyzed using X-ray diffraction method with aim to determine the mineral components. The results of the XRD were used for quantification of zeolite and calcite minerals using the sizing and specific gravity methods of De Gennaro and franko (1979), and Mondale et al. (1988). Pure phillipsite, faujasite and chabazite were separated from samples and used for XRD standard. The XRD results indicated that the zeolite minerals are composed of phillipsite, faujasite and chabasite as shown in Table 2 and Figure 2.

The results of the quantified zeolites and calcite indicated that the percent of phillipsite varies from 18.44 to 44.10%, chabazite from 23.75 to 27.72%, faujasite up to 6.32%, calcite from 5.24 to 22.91% and the pyroclasts from 20.72 to 47.63%. The average percentage of the zeolite minerals in all localities is between 50.00% and 85.48% as shown in Table 3. The high content of zeolites were indicated at locality four.

Table 2.
X-Ray Diffraction Analyses for representative samples from some boreholes

Sample No.	Ph	He	Cc	Au	F	Fa	Ch	Sm	G
BH1	***	*	*	**	***	**	**	*	-
BH3	**	*	*	**	***	*	**	*	*
BH5	***	*	*	**	***	*	***	*	-
BH7	***	*	*	**	***	*	***	*	-
BH9	***	*	*	***	**	*	***	*	-
BH11	***	*	*	**	***	*	**	*	-
BH21	***	*	**	**	***	*	***	*	-
BH25	*	*	**	***	**	*	***	*	*

Ph-Phillipsite, He-Hematite, Cc-Calcite, Au-Augite, F-Feldspar, Fa-Faujasite, Ch: Chabazite, Sm-Smectite, G-Gypsum, Major: ***, Minor: **, Trace: *

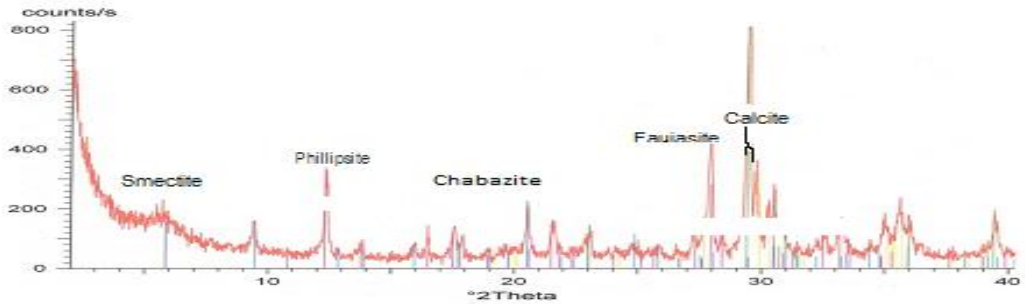


Fig. 2: X-ray diffractogram of the zeolitic tuff with typical reflections of major zeolite minerals and other secondary minerals

Table 3.
Shows the Zeolite percent at four localities using XRD method

Locality	Zeolites%
First	54.16
Second	52.09
Third	50.00
Fourth	85.48

Chemical Studies

Chemical analyses of some selected samples from zeolitic tuff are shown in Table 4. More than 88 samples were analyzed from boreholes using XRF methods. The results of chemical analyses demonstrated that the most important components of the main oxides which are belong to zeolitic tuff exclusive of H_2O, are SiO_2, Al_2O_3, CaO, Na_2O and K_2O (Table 4).The average content of SiO_2 is 47.65%, K_2O is 1.84%, Na_2O is 1.73%, Al_2O_3 is 12.46%, CaO is 6.07%, MgO is 6.83% and Fe_2O_3 is 11.99%. The variation of SiO_2/Al_2O_3 ratio varies between 2.93 and 3.8. The SiO_2/Al_2O_3 ratio controls the formation of zeolites (Cundy and Cox, 2005; De Silva and Sagoe-Crenstil, 2009). There is slight inverse relationship between CaO and SiO_2. This is most probably related to the transformation of the primary sideromelane to palagonite and formation of both zeolities and calcite. The SiO_2 content of the studied samples is confined between 40.77% and 47.90%. There is a distinctive variation in Na_2O and K_2O contents and K_2O/Na_2O ratio between the different localities. A wide range of K_2O/Na_2O ratio occurs in the studied samples that ranges between 0.44 to 1.66%. This most probably is related to two main factors: differences in parental magma, and related to the dominating zeolite phases, whether these phases are Na-rich, K-rich and/or Ca-rich (phillipsite and chabazite) (Khoury, et al., 2015).

Table 4.
XRF analyses shows the major oxides of the zeolitic tuff

Sample No.	L.O.I%	Fe_2O_3%	CaO%	K_2O%	Na_2O%	SiO_2%	Al_2O_3%	MgO%
BH1	15.79	12.15	5.75	2.21	1.33	42.68	13.71	5.57
BH3	12.63	13.89	8.59	1.78	1.49	42.45	11.88	6.11
BH5	15.03	12.06	5.13	2.14	1.44	42.94	13.23	6.38
BH7	8.97	15.06	5.16	2.04	1.95	47.63	12.03	6.16
BH9	12.49	13.56	4.50	2.24	1.84	43.69	12.87	6.81
BH11	15.07	10.86	7.48	1.78	2.18	42.42	12.88	5.52
BH20	14.36	10.43	14.79	0.45	1.02	40.77	12.15	4.24
BH21	9.15	13.23	4.13	1.37	2.54	47.90	12.05	7.75
BH22	9.44	12.98	6.28	2.12	2.02	43.72	13.9	7.94
BH23	10.90	13.13	7.50	2.03	1.94	42.32	12.66	8.58
BH8	10.96	13.16	6.11	1.60	1.75	43.55	12.54	8.57
BH6	11.53	14.74	2.9	1.43	1.29	45.89	10.35	8.62
BH11	11.93	14.73	3.90	1.81	1.24	43.66	12.45	8.40
BH25	12.46	12.59	4.21	2.21	2.29	47.52	12.10	6.51
BH4	12.23	12.60	4.62	2.44	2.13	48.21	12.11	5.35

Reserve Estimation

The estimation of the reserves of zeolites and volcanic tuff was based and measured by the nearest neighbor method assigns grade values to blocks from the nearest sample point to the block composed of polygons each with a unique grade, and with influence area for each borehole, taken into consideration that all layers have lateral distribution, with specific gravity of 1.6 for the ore. From the boreholes data it can be concluded that the thickness of the zeolitic tuff at the first locality varies from 1.5m (BH 1) to 15.85m (BH 6), while the thickness of the overburden ranges between zero level (BH6) up to 6.4m (BH3) (Table 5). The thickness of the zeolitic tuff at the second locality varies from 7.2m (BH 18) to 17. 5m (BH 14), while the thickness of the overburden ranges between zero level (BH14) up to 1.3 m (BH13) (Table 6). The thickness of the zeolitic tuff at the third locality varies from 4m (BH 24) to 26 m (BH 21), while the thickness of the overburden ranges between zero level (BH24) up to 1.3m (BH26) (Table 7). The thickness of the zeolitic tuff at fourth locality varies from 2m (BH 25) to 5.3 m (BH 26), while the thickness of the overburden ranges between zero level (BH25) up to 2.3 m (BH26) (Table 8).

It can be noticed that the depth of zeolitic tuff in the boreholes at four localities varies between 4.5 to 26 m. Lateral change in thickness can be traced at all boreholes, with some variation in the zoning of the zeolitic tuff that are related to changes in the colure, thickness, zeolite content, clastic materials and the overburden.

It can be assumed that the indicated volcanic tuff reserve estimation reaches up to 9.202.752 metric tons, while the measured zeolites reserves reaches up to 4.818.595 metric tons at all localities.

Table 5.
Reserves of the Zeolites and volcanic tuff at first location

BH No	Zeolites %	Volcanic Tuff (m.T)	Volume (m^3)	Thickness (m)	Area (m^2)	Zeolites (m.T)
TZ1	48.00	208399.20	130249.50	1.50	86833	100011
TZ2	51.58	118211.68	73882.30	3.10	23833	60973.59
TZ3	54.16	138665.28	86665.80	2.60	33333	75101.12
TZ4	49.34	148534.40	92834.00	2.00	46417	73286.87
TZ5	53.97	3454000.00	2158750.00	10.00	215875	1864123.8
TZ6	60.09	484376.00	3027350.00	15.85	191000	291077.68
TZ7	52.81	882000.00	551250.00	5.00	110250	465784.2
TZ10	51.82	22137.76	13836.10	8.30	1667	11471.344

Table 6.
Reserves of the Zeolites and volcanic tuff at second location

BH No	Zeolites %	Volcanic Tuff (m.T)	Volume (m^3)	Thickness (m)	Area (m^2)	Zeolites (m.T)
TZ1	55.53	234453.12	146533.20	10.20	14366	130180.09
TZ14	40.05	300076.00	187547.50	17.50	10717	120180.44
TZ15	49.57	2462.40	1539.00	4.50	342	1220.4886
TZ17	49.04	125030.40	78144.00	5.50	14208	61308.657
TZ18	51.28	19258.56	12036.60	2.70	4458	9875.7896
TZ19	59.14	183087.36	114429.60	13.80	8292	108277.86
TZ20	59.40	226000	141250	10.00	14125	134244

Table 7.
Reserves of the Zeolites and volcanic tuff at third location

BH No	Zeolites %	Volcanic Tuff (m.T)	Volume (m^3)	Thickness (m)	Area (m^2)	Zeolites (m.T)
TZ21	48.79	1355452.80	847158.00	26.00	32583.00	661313.1
TZ22	49.94	466127.20	291329.50	11.50	25333.00	232774.6
TZ23	49.90	506676.80	316673.00	19.00	16667.00	252846.2
TZ24	49.21	41068.80	25668.00	4.00	6417.00	20209.96

Table 8.
Reserves of the Zeolites and volcanic tuff at fourth location

BH No	Zeolites %	Volcanic Tuff (m.T)	Volume (m^3)	Thickness (m)	Area (m^2)	Zeolites (m.T)
TZ25	47.58	167734.40	104834.00	2.00	52417.00	79812.221
TZ26	54.22	119000.00	74375.00	3.50	21250.00	64521.8

Fig. 3. Core samples from borehole (A) and close up view of reddish zeolitic tuff (B)

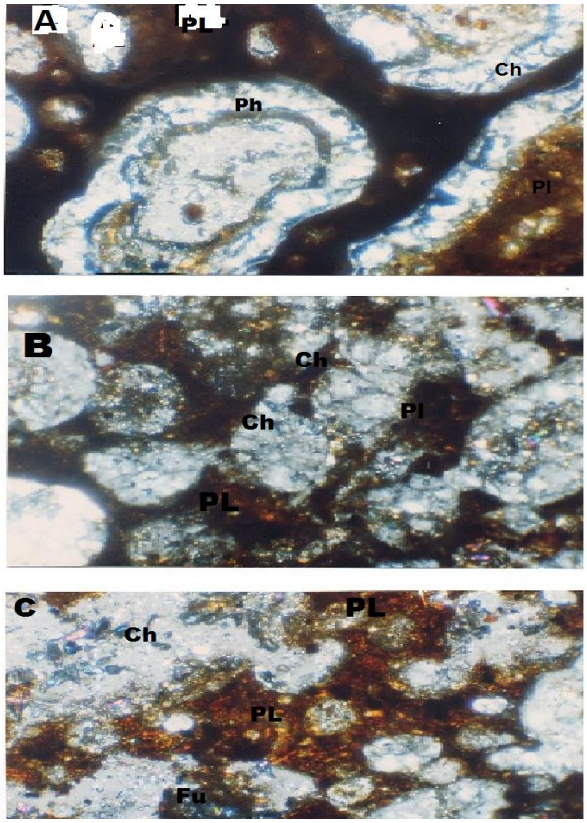


Fig. 4. Photomicrographs of the zeolitic tuff, showing phillipsite (Ph), Chabazite (Ch) and Palagonite (Pl) (XPL,X20)

Conclusions

The results indicated that there is a clear change in the proportions of the major oxides that are associated with zeolitic tuff in all boreholes, as a result of zeolitic process of transformation of glass material to zeolites, with the availability of the physical and chemical conditions to form zeolites minerals. Petrographically, the zeolitic tuff characterized by the presence of zeolite minerals, calcite, volcanic glass and iron oxides. Their presence and distribution in the studied samples from the boreholes is changeable and varies. Lateral and vertical changes can be traced through all localities, that is due to presence of wide variation of the zoning of zeolitic tuff at depth. It was also noticed that the oxides of silicon, aluminum, sodium and potassium ratios are high in the zeolite tuff with high content of zeolite minerals, compared with non-zeolitic tuff contained sidromelane and palagonite. It can be argued that the tuff with more palagonite characterized by decreasing in potassium, sodium and calcium oxides, and increasing in magnesium and iron oxides. It can be noticed also from the chemical results that the richest zeolite levels are characterized by high proportion of potassium oxide.

Results of XRD indicate the presence of zeolite minerals (Phillipsite, Chabazite, Faujasite and partially analcime), associated with calcite, and smectite and iron oxides as secondary minerals. The percent of the zeolite minerals range between 15 to 50.00% using point counting method, while by XRD method the percent of zeolite minerals ranges between 43.21 and 51.77%. It can be concluded that the depth of zeolitic tuff in the borehole is vary between 4.5 and 26 m. Lateral change in thickness can be traced at all boreholes with clear variation of the zoning of the zeolitic tuff which are related to the colure, thickness, zeolite content and the overburden. It can be assumed that the indicated volcanic tuff reserve estimation reaches up to 9.202.752 metric tons, while the measured zeolites reserves reaches up to 4.818.595 metric tons at all localities.The new zeolitic tuff deposits are of commercial value due to the high content of the zeolite

minerals, contain large grain size zeolite minerals, relatively poorly lithified and porous. These properties are all favourable for successful beneficiation. Experimental investigations on the zeolitic tuff emphasized the importance of the Jordanian zeolites for use in wastewater treatment plants and as a soil conditioner and as slow-release fertilizer.

Acknowledgment. The author would like to express his thank to Ministry of Energy and Mineral Resources, Natural Resources Authority. Thanks are due to anonymous reviewers for their positive comments

References

Al Dwairi, R. and I. Sharadqah. Mineralogy, geochemistry and volcanology of volcanic tuff rocks from Jabal Hulait AlGran, South of Jordan. - *Jordan J. Civil Eng., 8*, 2 2014.

Cundy, C.S., P.A. Cox. The hydrothermal synthesis of zeolites: precursors, intermediates and reaction mechanism. - *Micropor. Mesopor. Mater., 82,* 15, 2005. - 1–78.

De'Gennaro, M. and E. Franco. Arricchimento e separazione delle zeoliti di rocce piroclastich. - *L'Industria Minerari, 30*, 1979. - 329-339.

De Silva, P. and K. Sagoe-Crenstil. The role of Al_2O_3, SiO_2 and Na_2O on the amorphous? crystalline phase transformation in geopolymer systems. - *J. Aust. Ceram. Soc., 45*, 2009. - 63–71.

Dwairi, I.M. *A Chemical Study of the Palagonitic Tuffs of the Aritayn Area of Jordan, with Special Reference to Nature, Origin and Industrial Potential of the Associated Zeolite Deposits*. - Ph.D. Thesis, Hull Univ., UK, 1987. - 408 P.

Ghrir, A. *The distribution, nature, origin, and economic potential of zeolite deposits in Uneiza, Mukawir, and Tell Hassan of Jordan*. - M.Sc. Thesis, Univ. of Jordan, Jordan. 1998.

Hay, R. and A. Lijima. Nature and origin of palagonite tuffs of the Honolulu Group on Oahu, Hawaii. - *Geol. Soc. America Mem*., *116,* 1968. - 331-376.

Ibrahim, K. 1993. The geological framework of the Harrat Ash-Shaam Basaltic Super-Group and its volcanotectonic evolution. Natural Resources Authority, Bulletin 25, 33p.

Ibrahim, K. 1996. The authigenic zeolites of the Aritain Volcaniclastic Formation, northeast Jordan.*, Mineralium. Deposita*, 31:589-596.

Ibrahim, k. 1996. Geology, mineralogy, chemistry, origin and uses of the zeolites associated with Quaternary tuffs of northeast Jordan, Ph. D. thesis, Royal Holloway, University of London, 245p.

Ibrahim, K., and Hall, A. 1995. New occurrences of diagentic faujasite in the Quaternary tuffs of northeast Jordan. *Eur. J. Mineral,* 7:1129-1135.

Ibrahim, K., 2004. Mineralogy and chemistry of natrolite from Jordan. Clay Minerals 39, 47–55.

Khoury, Hani N., Khalil M. Ibrahim, Reyad A. Al Dwairi and Domingo G. Torrente. Wide Spread Zeolitization of the Neogene - Quaternary Volcanic Tuff in Jordan. - *Journal of African Earth Sciences, 101,* 2015. - 420–429.

Malabeh, A. *The Volcanology , Mineralogy, and Geochemistry of selected Pyroclastic cones from NE. Jordan and their evaluation for possible industrial applications.* - Ph.D. *Thesis,* Germany. 1993**.**

Mondale, K., F. Mumpton and F. Aplan. Beneficiation of natural zeolites from Bowie, Arizona: a preliminary report. - *In: L. B. Sand and F. A. Mumpton (eds.) Natural zeolites, occurrences, properties, use. Pergamon Press, Oxford*, 1988. - 527-538.

Rabba. I. and K. Tarawneh. New Occurrences of the zeolite deposits in the volcanic tuff at the Tlul Ash Shahba/ NE Jordan (in Arabic). - *NRA, Geol. Dir, Geol. Map. Div., Internal Report, Amman, Jordan*. 2001.

Tarawneh, K. Mineralogy and petrography of new occurrences deposits of the zeolitic tuff in northeast Jordan. - Annual of University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski". Vol. 47, part 1, Geology and Geophysics, 2004. - 27-32.

Tarawneh, K. and W. Abu Jassar. Mineralogy of the Pyroxenite from Jabal El Aritayn/ NE Jordan. - *NRA, Geol. Dir., Geol. Map. Amman, Jordan.* 1994.

Tarawneh, K., I. Shimon, Y. Harlavan, I. Rabba, R. Weinberger, K. Ibrahim, S. Peltz, G. Steinitz. *K-Ar dating of the Harrat Ash-Shaam Basalts, NE Jordan*. - NRA & Geol. Survey of Israel, GSI/2/2000, 2000. - 59p.

Tarawneh, K., K. Ibrahim and I. Rabba. Petrography, geochemistry and K-Ar geochronology of the dike systems (NW-SE) of the Harrat Ash Shaam in Northeast Jordan. - *Mu'tah Lil – Buhuth wad-Dirasat,* Natural and Applied Series, *17, 3*, (2002). - 69-87.

Tarawneh, K. Mineral occurrences in the Badia Region, NE Jordan. - *Annual University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski". Vol. 46, part 1, Geology and Geophysics,* 2003. – 167- 70.

The article is reviewed by Assist. Prof. Dr. Miloslav Katsarov and recommended for publication by the Department "Geology and Exploration of Mineral Resources".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

TIMOK FAULT AND TERTIARY STRIKE-SLIP TECTONICS IN PART OF WESTERN BULGARIA

Dian Vangelov[1], Miroslava Pavlova[1], Ianko Gerdjikov[1], Alexandre Kounov[2]

[1] Sofia University "St. Kl. Ohridski", 15 Tzar Osvoboditel Blvd, 1504 Sofia, Bulgaria, dedo@gea.uni-sofia.bg
[2] Institute of Geology and Paleontology, Basel University, CH-4056 Basel, Switzerland, a.kounov@unibas.ch

ABSTRACT. The existence of NW-SE and NNW-SSE trending, regional-scale faults is well-known feature in the area of Tran and Breznik (West Bulgaria). Despite the numerous studies in the area, there is a lack of direct data about the kinematics of the main fault zones. Our investigations allow to define three groups of faults and also demonstrate the dominant dextral strike-slip kinematics of the faults from Pernik fault zone, as well as of several segments of Tran-Kosharevo fault. The field data, together with analysis of the existing maps, suggest the existence of another main strike-slip fault zone with almost N-S strike – the Timok fault. This fault is well-documented in Eastern Serbia, as its continuation in the area of Tran (Kraishte zone) was already suggested by Karaguleva et al. (1980) and Krautner and Krstic (2003). In the westernmost parts of Bulgaria, the Timok fault is traced along the fault segments, previously interpreted as parts of Tran-Kosharevo fault. To the Southward the zone is following the Serkirna fault. Unlike the northeast Serbia the translations along the Timok fault in western Bulgaria are much smaller – probably of not more than few kilometers. Additionally, our new data do not support the idea that these fault zones are part of Maritsa fault zone, well-defined southeast from Sofia.

Key words: Timok fault, strike-slip tectonics, western Bulgaria

ТИМОШКИЯ РАЗЛОМ И ТЕРЦИЕРНА ОТСЕДНА ТЕКТОНИКА В ЧАСТ ОТ ЗАПАДНА БЪЛГАРИЯ

Диан Вангелов[1], Мирослава Павлова[1], Янко Герджиков[1], Александър Кунов[2]
[1] Софийски Университет "Св. Кл. Охридски", бл. „Цар Освободител" 15, 1504 София, dedo@gea.uni-sofia.bg
[2] Institute of Geology and Paleontology, Basel University, CH-4056 Basel, Switzerland, a.kounov@unibas.ch

РЕЗЮМЕ. Съществуването на регионални разломявания с посока северозапад-югоизток до север-северозапад-юг-югоизток е отдавна познат феномен за района на Трънско и Брезнишко. Въпреки многобройните изследвания, конкретни данни за кинематиката на тези разломи не са излагани. Проведените теренни изследвания позволяват да се дефинират основно три групи разломи, като също указват за предимно дясно отседен характер на движенията по тези от Пернишката разломна зона, а така също и по редица сегменти на Трънско-Кошаревския разлом. Теренните данни, както и анализа на картните материали показват присъствието на още една регионална отседна структура – Тимошкия разлом, характеризиращ се с почти север-южна посока. Този разлом е ясно обособен в Сърбия като неговото продължение в района на Трънското Краище вече беше подсказано от Karaguleva et al. (1980) и Krautner and Krstic (2003). В най-западните части на българска територия, Тимошкият разлом съответства на разломявания, в миналото интерпретирани като оперяващи сегменти на Трънско-Кошаревския разлом. В южна посока негово продължение се явява Секирненския разлом. За разлика от североизточна Сърбия, в Трънско транслациите по Тимошкия разлом са много по-малки (до няколко километра). Не може да бъде потвърдена и идеята, че коментираните зони са част от Маришката разломна зона, добре дефинирана на югоизток от София

Ключови думи: Тимошки разлом, отседна тектоника, западна България

Introduction

One of the distinctive features of north vergent branch of the Alpine orogen in the Balkan Peninsula is its highly arcuate geometry (Fig. 1, e.g. Burchfiel, 1980; Csontos and Vörös, 2004; Schmid et al., 2008). Especially the linkage between the Carpathians and the Balkanides is characterized by a westward convex arc, probably formed by oroclinal bending during the northward movement of the Carpathians units when invading the so called Carpathian embayment (e.g. Channel and Horváth, 1976; Burchfiel, 1980; Csontos and Vörös, 2004; Fügenschuh and Schmid, 2005). This Early Oligocene to Early Miocene movement was accommodated by dextral strike-slip motion along curved fault systems such as Cerna-Jiu and Timok faults (Fig. 1, Berza and Drăgănescu, 1988; Ratschbacher et al., 1993; Kräutner and Krstić, 2002, 2006; Schmid et al., 2008; Tarapoanca et al., 2007) with total displacements of up to 100 km (Moser, 2001; Fügenschuh and Schmid, 2005). However, recently Shaw and Johnston (2012) presented an alternative model, based on paleomagnetic data, in which the Carpathian–Balkan bend formed as a result of vertical axis rotation of an originally linear orogen.

The existence of major wrench faults along the western boundary of the Moesian platform was already known since the 1950's (e.g. Sikošek, 1955) whereas their significance for the formation of the Carpathian-Balkan arc was recognized from the beginning of the 1980's (e.g. Karagjuleva et al., 1980). Unfortunately, the existence of these early contributions not only left unrecognized by the scientist dealing with large-scale Alpine reconstructions, but their implications were not taken into account in the most recent studies of the tectonics of western Bulgaria (Marinova et al., 2010 a,b).

Sikošek (1955) describes the north-south trending large strike-slip fault zone in the easternmost Serbia as Poreč-Timok dislocation. Based on the offset of rock units, minimum displacement of about 50 km along this structure was estimated. Furthermore, Karagjuleva et al. (1980) described the Poreč-Timok dislocation as part of much longer fault (Timok-Pirot-Bunovo fault) that stretches for more than 150 km from Southern Carpathians to the western Bulgarian Kraishte area. To our knowledge, the study of Karagjuleva et al. (1980) is the only one dealing with the problem of the continuation of Timok strike-slip zone in Bulgaria. According to these authors the trace of the fault runs along a complexly faulted area east to southeast of Tran and further south in Kraishte area. Much later, Kounov et al. (2011) connected Timok fault zone with strike-slip structures, responsible for the development of Late Oligocene - Early Miocene basins in Kraishte area. The most prominent fault zones in the Kraishte are the Tran-Kosharevo and Pernik faults (Figs. 2 and 3,e.g. Kostadinov, 1977, 1971). They are both described as up to several kilometers wide faulted domains incorporating single faults or fault zones with various kinematics all having similar NNW-NW–SSE-SE strikes. They are considered as marking the boundary between Sredna Gora and Kraishte zones of the Balkanides (e.g. Ivanov, 1998) recording a complex evolution including multiple reactivations (e.g. Zagorchev et al., 1995). According to Bojadjiev et al. (1971) the Pernik fault represents the westernmost continuation of the Maritsa fault zone (Fig. 1). Similar suggestion about the western prolongation of the Maritsa fault system was made later by Ivanov (1998). He also interpreted the Tran-Kosharevo and Pernik zones as Late Alpine strike-slip faults.

Unfortunately the suggested relationships between the Timok fault in Serbia and the Tran-Kosharevo and Maritsa faults rests purely empiric and the last detailed structural studies in the area dates from the early 1970's. Here we present some new structural data and observations from the area of Tran shedding some new lights on the problems related to the correlations and direct interconnections between these major Cenozoic tectonic features in the Balkanides.

Gelogical setting

The major tectonic features characterizing the area of Tran are the Tran anticlinorium and the Lyubash monocline (for overview and detailed references see Ivanov, 1998; Zagorchev, 2001). The Precambrian metamorphic rocks (Vukan complex of Marinova et al., 2010) in the core of the Tran anticlinorium are intruded by Ediacaran-Cambrian and Variscan magmatic rocks. The post-Variscan sedimentary cover from the limbs consists of Permian to Valanginian deposits (Fig. 2). The structure is strongly fragmented by several fault systems (Fig. 2).

To the northeast the Tran anticlinorium is separated from Lyubash monocline by the various faults and fault segments collectively known as Tran-Kosharevo fault (Kostadinov, 1977). The monocline is extending more than 40 km from the Bulgarian border to the Pernik basin and is built of Paleozoic to Mesozoic northeast dipping sediments (Fig. 2, Kostadinov, 1977). Its continuation northwest in Serbia is known as Kusovrana anticline (Fig. 2, Anđelković et al., 1977). To the northeast Pernik fault zone separates the Lyubash monocline form the Late Cretaceous sedimentary basin of Sredna Gora zone (Fig. 2).

The Tran anticlinorium and the Lyubash monocline were formed most probably during the Early Alpine (late Early Cretaceous) orogeny (e.g. Zagorchev, 2001) whereas they, or at least part of them, have experienced some exhumation during the later tectonic phases (e.g. Antić et al., 2016).

Tran anticlinorium and Lyubash monocline are situated in the footwall of a prominent Early Alpine thrust (e.g. Zagorchev, 2001) that emplaces the Lower Paleozoic sediments of the Morava Unit onto the Mesozoic sediments from the southwest periphery of the Tran anticlinorium (Fig. 2). The easternmost preserved frontal part of the allochthon (Penkiovtsi klippe) is cropping out in the western part of the study area (Figs. 2 and 3).

Main results and previous considerations

Field studies aiming to unravel the evolution of the complicated fault network in part of Kraishte zone were carried out in the area of Tran (Fig. 2). When outcrop conditions allowed a structural analysis of the faults was also conducted.

Our study also includes a careful analysis of all previous maps and cross-sections, combined with the use of detailed satellite imagery. We have been able to produce compiled geological map of the investigated area (Fig. 2) which is primary based on recently published maps for the Bulgarian part of the area (Marinova et al., 2010a, 2010b) and the geological map of SFR Yugoslavia 1:100 0000, sheet Breznik (Anđelković et al., 1977) for the Serbian territory.

Our structural data were combined with the analysis of the published maps, which performed along the three previously recognized major groups of faults and fault zones in the study area. One trending generally NW-SE, another striking N-S to NNW-SSE and individual faults oriented NE-SW and WNW-ESE.

NW-SE trending fault zones

The Pernik fault zone is up to several kilometers wide zone of localized brittle deformation which consists of prominent set of NW-SE trending faults (Figs. 2 and 3, Kostadinov, 1971). They are developed mostly in the Upper Cretaceous sediments or along their contact with the Tithonian-Berriasian carbonates of the Lyubash monocline and can be traced almost continuously from Bankia to the area of Breznik (Fig. 2). Northwest of Bankia, in Serbia, this zone probably continues along the contact of the Upper Cretaceous sediments and the Tithonian-Berriasian carbonates. Most of the faults of this zone are steep and in several cases fault planes bear slikenfibres that indicate dextral-strike slip movement (Fig. 3). However, previous authors have reported some exhumation of the Lyubash monocline along this zone describing it as a horst-monocline (e.g. Kostadinov, 1977).

Previously the Tran-Kosharevo fault was described as a structure generally bordering the Lyubash monocline from the SW and trending N-S from the area of Tran to Ezdemirtsi,

where changing to SE direction (Kostadinov, 1977; Marinova et al., 2010a, b). Our new field data, as well as the analysis of the maps indicate that this supposedly single structure actually encompasses, at least, two different faults. The Kosharevo fault, which is striking NW-SE, could be clearly followed along the western boundary of the Lyubash monocline from Kosharevo northward to Banishte where it ends up in the NNW-SSE trending structure which we are attributing here to the Timok fault.

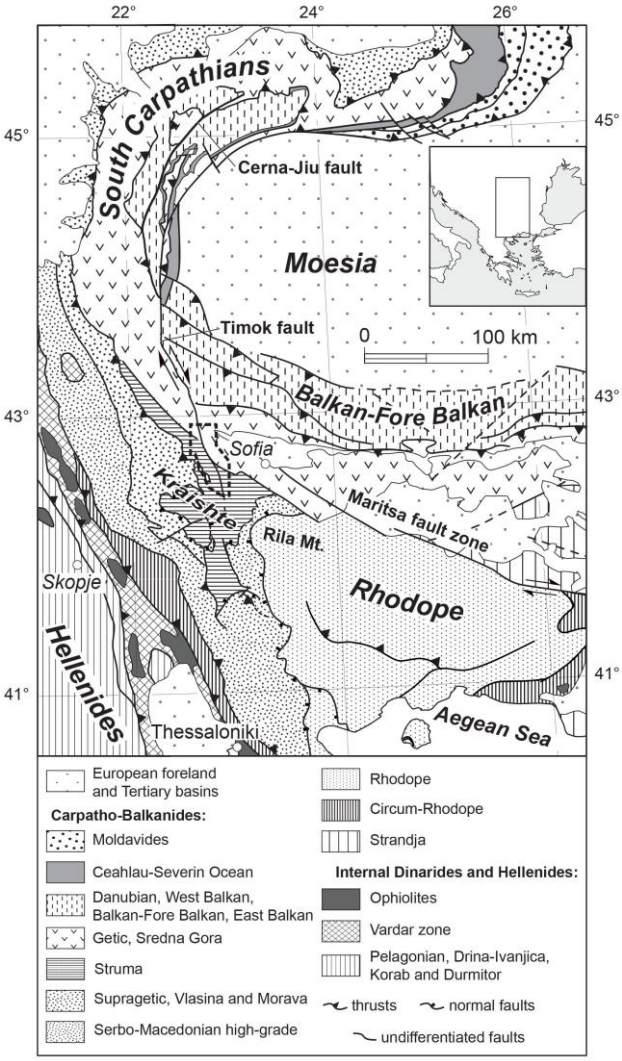


Fig. 1. Tectonic map of part of Balkan Peninsula (after Schmid et al., 2008). Box outlines Figure 2

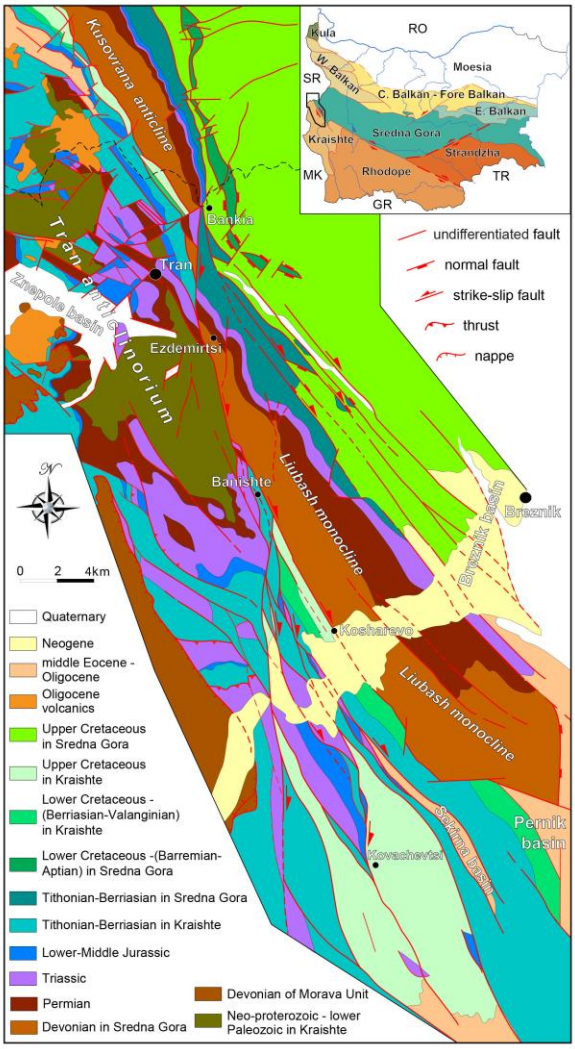


Fig. 2. Geological map of the study area (after Marinova et al., 2010a,b; Kräutner and Krstić, 2003)

As a logical continuation of the Tran-Kosharevo fault, north of Tran, we suggest the fault bordering to the southwest the Lower Paleozoic sediments of the Lyubash monocline and its continuation, the Kusovrana anticline in Serbia, named here as Tran fault (Figs. 2 and 3).

N-S to NNW-SSE trending fault zones

This fault system of N-S to NNW-SSE trending faults have been previously described in the study area (Karagyuleva, 1970; Kostadinov, 1971, 1977). In the light of our field observations the N-S fault between Bankia and Banishte, previously regarded as a part of the Tran-Kosharevo fault, is now considered as an independent fault representing a direct continuation of the Timok fault in Bulgaria. This is in agreement with the existence of N-S trending faults in neighbouring Serbia (Fig. 3, Kräutner and Krstić, 2002). South of Banishte, the Timok zone can be traced along previously recognized Sekirna fault (Karagyuleva et al., 1980; Marinova et al., 2010a). There is not enough field data to document the continuation of the Timok zone south of Bunovo (south of the study area), as suggested by Karagyuleva et al. (1980). It could be proposed that the fault zone ends up in a horsetail splay of faults, which could be clearly observed south of Kosharevo in the southern part of the study area (Figs. 2 and 3).

Field observations, combined with analysis of existing geological maps and satellite images clearly shows that Timok fault cuts the older Tran-Kosharevo fault (Figs. 2 and 3). This is evident by the ~2.5 km offset of the Lyubash monocline along the Timok fault between Bankia and Ezdemirtsi (Fig. 2). It is important to notice that amount of strike-slip displacement along the Timok fault decrease from 50 km in northeastern Serbia (Sikošek, 1955) to ~2.5 km in the Kraishte zone suggesting dying out of the structure in the area.

NE-SW and WNW-ESE oriented individual faults

Another distinct fault group, in the study area, is presented by NE-SW and WNW-ESE structures which are generally characterized by their relatively short length. These faults clearly cut the faults of the other two groups and are mostly developed in the core of the Tran anticlinorium (Figs. 2 and 3). Southwest of Bankia such NE-SW trending dextral strike-slip fault is offsetting both the Tran and Timok faults (Figs. 2 and 3).

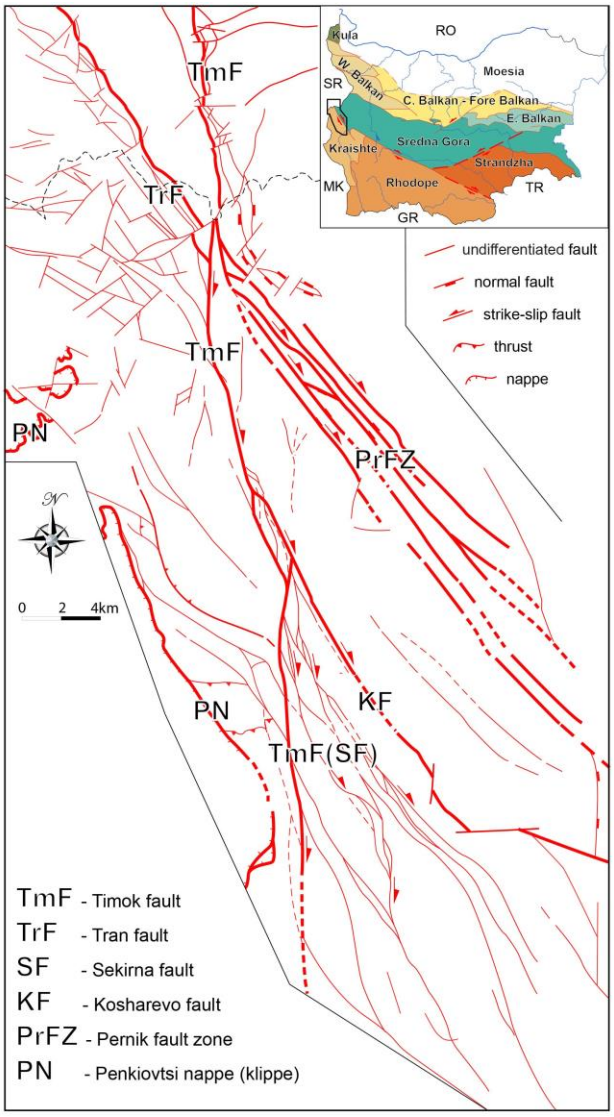


Fig. 3. Tectonic sketch map of the study area. Thicker lines represent the major faults discussed in the text

Discussion and conclusions

The time of the activities along the first two groups of faults could be well constrained by the age of the youngest sediments which they cut and the oldest which are sealing them. These are, respectively, the Late Oligocene - Early Miocene sediments of the Pernik and other smaller basins from the southern part of the study area and the Late Miocene-Pleistocene sediments filling small basins such as Znepole and Breznik (Fig. 2). These sedimentary sequences give a very narrow age span of activity between the Early and the Late Miocene. Only the NE-SW and WNW-ESE oriented faults seem to be active even during the Quaternary.

It was previously proposed that the formation of the Late Oligocene-earliest Miocene NW-SE elongated continental basins in Kraishte such as Sekirna, Pernik and Bobov Dol was related to dextral strike-slip tectonics during SSE-NNW transtension (Moskovski, 1971; Kounov et al., 2011). The evolution of the sedimentary basins was obviously controlled by the NW-SE oriented faults, of the first group, in releasing bend zones or at their terminations (Kounov et al., 2011). It must be noticed that activation of this fault group was facilitated by the fact that often they present a set of already existing inherited structures. The observed local thrusting of the basement rocks onto the Cenozoic sediments and their folding may have developed in restraining bend zones where permutation of the $\sigma 1$ and $\sigma 2$ stress axes has occurred (Kounov et al., 2011). It could be supposed that a NE-SW oriented $\sigma 1$ major stress axes was responsible for the formation of the NNW-SSW to N-S dextral strike-slip faults of the second group. Strike-slip tectonics in the Kraishte area was already explained by the processes of northeastward lateral extrusion and rotation of continental fragments around the western boundary of the Moesian platform (Boccaletti et al., 1974; Tapponnier, 1977; Burchfiel, 1980; Schmid et al., 1998; Fügenschuh and Schmid, 2005; Kounov et al., 2011). On the other hand the NE-SW oriented middle Miocene compression in the Balkans was related to the arrival of the Kruja crustal fragment at the north Hellenic trench in Albania (Burchfiel et al., 2008).

In line with the ideas of previous researchers (e.g. Kostadinov, 1970, 1977; Zagorchev, 2001) it could be suggested that the localization of the main fault systems is a result of structural inheritance from Variscan and Early Alpine weak zones. The most striking example is the southwestern margin of the Lyubash monocline, where there are clear evidence that tectonic activities along the precursors of the Kosharevo fault had controlled the sedimentation in the area since the Paleozoic (e.g. Kostadinov, 1970).

Our data also give some arguments for questioning the proposed link between the NNW-SSW to N-S trending steep fault zones in western Bulgaria and the fault segments that form the Maritsa fault zone (Bojadjiev et al., 1971). The strongest arguments are the overall geometry of the fault systems in this part of Bulgaria and the lack of robust data for supporting the connection between Pernik and the Maritsa fault zones. The main trace of the Maritsa zone is running along the Iskar River valley between Iskar dam and the Pancharevo (east from the study area), whereas farther northwest the zone is buried below the sediments of the Quaternary Sofia graben (Fig. 1, Gerdjikov et al., 2015). Furthermore, Gerdjikov et al. (2015) reported Eocene magmatic rocks sealing the fault zone. On the other hand, the suggested trace of Maritsa zone along northeastern footstep of Rila Mountain (Fig. 1) and northeast rim of the Palakariya graben (e.g. Ivanov, 1998) is very poorly documented and there is no reliable data for exact geometry, kinematics and timing of the movements along the fault segments. Taken together these facts rule out the possibility of direct continuation of Maritsa fault zone in the Kraishte area. Furthermore, our data suggest that the Tran-Kosharevo fault is not a single fault structure whereas its generally N-S trending

part belongs to the Timok fault. Unlike the classical area in Eastern Serbia (Sikošek, 1955), in this southern part the translations along the dextral fault zone are much smaller – probably of less than few kilometres.

Acknowledgements. This work was supported by the Sofia Universtity grant N 147/08/05/2014.

References

Anđelković, J., Krstić, B., Bogdanović, P., Jadranin, D., Milencović, P., Milošaković, R., Urošević, D., Dimitrievič, M., Dolić, D., Rakić, M.O., Jovanović, L.J., Maslarević. L.J., Marković, B., Divljan, M., Đorđević, M. *Osovna geološka karta 1:100 000. Tumač za listove Pirot i Breznik*. Savezni geološki zavod, Beograd. 1977, (in Serbian).

Antić, M., Kounov, A., Triviić, B., Wetzel, A., Peytcheva, I. and von Quadt, A. Alpine thermal events in the central Serbo-Macedonian Massif (SE Serbia). - *International Journal of Earth Sciences*, *105*, 2016. - 1485-1505.

Bojadjiev, S., I. Boyanov, V. Kostadinov. Maritza deep fault. In: *Tectonic structure of Bulgaria*. - S., Technica, 1971. - 558 p. (in Bulgarian)

Berza, T., A. Drăgănescu. The Cerna-Jiu fault system (South Carpathians, Romania), a major Tertiary transcurrent lineament. - *Dări de Seamă Institutul de Geologie si Geofizică, 72–73*, 1988. - 43–57.

Boccaletti, M., Gocev, P. and Manetti, P. Mesozoic isotopic zones in the Black Sea region. - Bolletino della Società Geologica Italiana. 93, 1974. - 547-565.

Burchfiel, B.C. Eastern European Alpine system and the Carpathian orocline as an example of collision tectonics. – *Tectonophysics, 63,* 1980. - 31–61.

Burchfiel, B.C., Nakov, R., Domurdzanov, N., Papanikolau, D., Tzankov, T., Serafimovski, T., King, R.W., Kotzev, V., Todosov, A. and Nurce, B. Evolution and dynamics of the Cenozoic tectonics of South Balkan extensional system. - Geosphere, 4, 2008. -919-938.

Channell, J.E.T., F. Horvath. The African/Adriatic promontory as a paleogeographical premise for Alpine orogeny and plate movements in the Carpatho-Balkan region. – *Tectonophysics,* 35, 1976. - 71–101.

Csontos L., A. Vörös, Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. - *Paleogeography Paleoclima-tology Paleoecology*, 210, 2004. - 1–56.

Fügenschuh, B., S. M. Schmid. Age and significance of core complex formation in a very curved orogen: Evidence from fission track studies in the South Carpathians (Romania). - *Tectonophysics*, 404(1–2), 2005. - 33–53, doi:10.1016/j.tecto.2005.03.019

Gerdjikov, I., A. Radulov, L. Metodiev. Cretaceous-Tertiary deformation styles along a part of the Maritsa fault system between Pazardzhik and Sofia. - *In: Proc. Of National Conference Geosciences., S.*. 2015. - 89-90 (in Bulgarian).

Ivanov, Z. *Tectonics of Bulgaria*. Professorship Thesis, Sofia University. 1998. (in Bulgarian).

Karagjuleva, J. Stanyovtsi graben complex. II. Internal structure and evolution. - *Bull. Geol. Institute, ser. Geotectonics*, *19,* 1970. - 61-89, (in Bulgarian).

Karagjuleva, J., V. Kostadinov, E. Boncev. The Carpatho-Balkan sigmoid in the context of shearing transite wrench fault lines. - *Geologica Balcanica*, *10, 1*, 1980. - 3-14.

Kostadinov, V. Structure and development of the Pernik fault zone, to the north-west of the Strouma river valley. - *Bull. Geol. Institute, ser. Geotectonics, 20*, 1971. - 29-65, (in Bulgarian)

Kostadinov, V. Tectonic structure of the Lyubash horst monocline. - *Geotect., tectonophys., and geodynam.*, *6,* 1977. - 3-24.

Kounov, A., Burg, J-P., Bernoulli, D., Seward, D., Ivanov, Z., Dimov, D. and Gerdjikov, I. Paleostress analysis of Cenozoic faulting in the Kraishte area, SW Bulgaria. - Journal of Structural Geology, 33, 2011. - 859-874.

Kräutner, H.G., B. Krstić. Alpine and Pre-Alpine structural units within the Southern Carpathians and the Eastern Balkanides. - Proceedings of XVII. Congress of Carpathian-Balkan Geological Association Bratislava, September 1–4 2002. *Geologica Carpathica*, 53 Special Issue. 2002.

Kräutner, H. G., B. Krstić. *Geological Map of the Carpatho-Balkanides between Mehadia, Oravita, Nis and Sofia*. Geoinstitut, Belgrade. 2003.

Kräutner, H.G., B. Krstić. Geological map of the Carpatho-Balkanides bewteen Mehadia, Oravita, Nis and Sofia. CD-version provided at the 18th Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association, Belgrade, 2006.

Marinova, R., V. Grozdev, D. Ivanova, D. Sinyovski, P. Milovanov, I. Petrov, A. Popov*Geological map of Bulgaria in 1:50 000 scale. Map sheet Tran*. . 2010a. (in Bulgarian).

Marinova, R., V. Grozdev, D. Ivanova, D. Sinyovski, I. Petrov, P. Milovanov, A. Popov. *Geological map of Bulgaria in 1:50 000 scale. Map sheet Breznik*. 2010b, (in Bulgarian).

Moser, F. *Tertiäre Deformation in den rumänischen Südkarpathen: Strukturelle Analyse eines Blattverschiebungskorridors am Westrand der mösischen Plattform.* - Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten Reihe A, Band 63, 2001. - 169 pp.

Moskovski, S. On the sequence in the formation of PaleogeneeNeogene graben structures in the Kraishtides in Bulgaria. - Review of the Bulgarian Geological Society 32, 1971. -21-31. (in Bulgarian, with English abstract)

Ratschbacher, L., Linzer, H.G., Moser, F., Strusievicz, R.O., Bedelean, H., Har, N., Mogos, P.A. Cretaceous to Miocene thrusting and wrenching along the central South Carpathians due to a corner effect during collision and orocline formation. – *Tectonics,* 12, 1993. - 855–873.

Shaw, J., S.T. Johnston. The Carpathian–Balkan bends: an oroclinal record of ongoing Arabian–Eurasian collision. - *Journal of the Virtual Explorer,* 43, 2012.. doi:10.3809/jvirtex.2012.00310

Sikošek, B. Einige geotektonische beobachtungen im Ostteil Ostserbiens. - *Recueil des travaux de l'institut de geologie "Jovan Zujovic*", 8, 1955. - 11-19.

Schmid, S.M., D. Bernoulli, B. Fügenschuh, L. Matenco, S. Schefer, R. Schuster, M. Tischler, K. Ustaszewski. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. - *Swiss Journal of Geosciences, 101*, 2008. - 139–183.

Tapponnier, P. Evolution tectonique du système alpin en Méditerranée: poinçonnement et écrasement rigide-plastique. - Bulletin de la Société géologique de France. 7, 1977. -437-460. (in French)

Tarapoanca M., D. Tambrea, V. Avram, B.M. Popescu. The geometry of the South Carpathians sole thrust and the Moesia boundary: the role of inherited structures in establishing a transcurrent contact on the concave side of the Carpathians. In: *Thrust Beltsand Foreland Basins: From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*, Lacombe O., Lave J., Roure F., Verges J. (eds), Frontiersin Earth Sciences, 2007. - 492-508.

Zagorchev, I. Geology of SW Bulgaria: an overview. - *Geologica Balcanica*, *21, 1-2*; 2001. - 3-52.

Zagorchev, I., V. Kostadinov, D. Tchounev, R. Dimitrova, I. Sapunov, P. Tchoumatchenco, S. Yanev. *Explanatory note to the geological map of Bulgaria on scale 1:100 000. Vlasotince and Breznik sheets*. Sofia. 1995. (in Bulgarian).

The article is reviewed by Prof. DSci Dimitar Sinnyovsky and recommended for publication by the Department "Geology and Geoinformatics".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

РАЗСИПНО ЗЛАТО В ЕОЦЕНСКИ СЕДИМЕНТИ ОТ ИЗТОЧНИЯ БАЛКАН И ПРЕД-БАЛКАН

Венелин Желев, Георги Айданлийски, Иван Петров

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, vjjelev@yahoo.com, g.ajdanlijsky@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Разсипно злато е установено в няколко проби от два локалитета: от местн. Чекелеза (западно от Обзор) и от местн. Немой дере (Ришки проход). В първия локалитет то е доказано в шлих от Обзорската конгломератна свита (Среден-Горен Еоцен), докато във втория – в шлих от Армерския конгломератен член на Двойнишката свита (Долен-Среден Еоцен). Характеристичен белег за двете литостратиграфски единици е присъствието на екстракласти от вулкански и интрузивни скали, разкриващи се в коренни разкрития на Средногорската зона, които са най-вероятния източник и на златото. Присъствието им сред еоценските седименти се обяснява с Илирската (следлютеска) орогенеза, в резултат на която се образуват Източните Балканиди. Въпреки литоложкото си сходство и близките си възрасти, двете литотела се различават по тектонското си положение. Армерският член е син-тектонски, а Обзорската свита – пост-тектонска.

Ключови думи: Еоцен, Източен Балкан и Предбалкан, разсипно злато

PLACER GOLD IN EOCENE SEDIMENTS OF EASTERN BALKAN AND FOREBALKAN

Venelin Jhelev, George Ajdanlijsky, Ivan Petrov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, vjjelev@yahoo.com, g.ajdanlijsky@mgu.bg

ABSTRACT. Placer gold is found in several samples taken from two localities: from Chekeleza area (west of Obzor town) and from Nemoi Dere area (Rish Pass). In the first locality it is established in heavy mineral fraction from the sediments of the Obzor Conglomerate Formation (Middle-Upper Eocene), while in the second one – in heavy mineral fraction of the Armera Conglomerate Member of Dvoinitza Formation (Lower-Middle Eocene). Characteristic feature of both lithostratigraphic units is the presence of extraclasts of volcanic and intrusive rocks, cropping out in autochthoneous position in Srednogorie Zone, which are the most probable gold source. Its presence among Eocene sediments is explained by Illyrian (post-Lutetian) orogeny, resulting in formation of Eastern Balkanides. Despite their lithological similarities and close ages, both units differ in their tectonic position - the Armera Member is syn-tectonic while the Obzor Formation is post-tectonic.

Key words: Eocene, Eastern Balkan and Fore-Balkan, placer gold

Въведение

Първите данни за присъствие на разсипно злато в палеогенските седименти от Източния Балкан са установени при геоложката картировка в М 1:25 000 (Джуранов и др.,1994). Изследвани са три шлихови проби от Обзорската конгломератна свита (Среден-Горен Еоцен), като в една от тях е доказано разсипно злато. Подобни непубликувани данни от единични проби са установени по-късно и за конгломератната задруга (Долен-Среден Еоцен) в местн. Немой дере, пред фронта на дислокацията на Чудните стени. Целта на настоящото изследване е да се провери, детайлизира и разшири тази информация чрез ново опробване.

В съседен район на изследваните от нас площи, Йовчев (2015) доказва разсипно злато и платина в алувиалните наслаги на р. Двойница (около с. Дюлино) и в десни притоци на р. Камчия (около Г. Чифлик), за които предполага, че са генетически свързани със Средногорския магматизъм, но са преотложени в съвременния алувий от междинни колектори - седиментите на Двойнишката (Горен Палеоцен-Среден Еоцен) и Долночифлишката (Среден-Горен Еоцен) свити. Този извод, обаче, изисква анализ на скалите, разкриващи се във водосборните басейни, подхранващи златоносния съвременен алувий. Например златото в десните притоци на р. Камчия може да идва не само от Долночифлишката свита, но и от седиментите на Двойнишката свита (най-вероятно Армерския конгломератен член). За да се игнорират подобни непълноти, при настоящото опробване е изследван изкуствен шлих, добит директно от еоценските седименти.

Регионална геоложка обстановка

Опробването се извърши в две изолирани една от друга площи: Обзор и Немой дере (фиг. 1, А). Обект на опробване в Обзорската площ са конгломератите на Обзорската свита, които изграждат една позитивна релефна форма (височината Чекелеза), западно от Обзор (фиг. 1, В). Обзорската конгломератна свита е въведена под името Гьозекенски конгломерат (Гочев, 1932), което е заменено с Обзорски конгломерат (Ботев, 1953), а рангът е определен от Джуранов и Пимпирев (1989). Изградена е

предимно от груботеригенни седименти – конгломерати и пясъчници, с подчинено количество глини и редки прослойки от мергели и варовици. Конгломератите варират от блоково-валунни до гравийни. Спойката е песъчлива, песъчливо-гравийна и по-рядко глинесто-песъчлива. В пясъчниковите наслаги преобладават вулканомиктовите пясъчници. Кластите в конгломератите са до 62 % от вулкански скали и по-рядко от пясъчници, глини и интрузивни скали (фиг. 1, В). Късовете от вулканити и интрузивни скали са добре загладени, често с формата на триосен елипсоид, като образуват характерна имбрикационна текстура (фототаблица I, сн. 1-3). Седиментните късове са най-често ръбести или слабо загладени. За вулканските и интрузивните късове се предполага транспорт от коренните им разкрития в Средногорието, а останалите класти са от Еминската и Двойнишката свита. Съставът на късовете, степента на загладеност и измерената имбрикация (фиг. 1, В), свидетелстват за транспорт от юг на север.

Свитата лежи трансгресивно и дискордантно върху различни нива на Двойнишката свита (вероятно и върху Еминската свита), като оформя една плитка синклинала. Дебелината й е около 150 m. Въз основа на намерената макро- и микрофауна (за част от която се предполага преотлагане), както и взаимоотношенията й с Двойнишката свита, се приема средно-горноеоценска възраст (Джуранов и Пимпирев, 1989, Джуранов и др., 1994; Синьовски, 1996).

Според Джуранов и др. (1994), разглежданият участък е фрагмент от Еминската зона на интензивно деформираната илирска Лудокамчийска единица. Тук тя включва Ираклийската антиклинала и Двойнишка синклинала, с преобърнато и частично скъсано общо бедро (Монапетренски разлом, фиг. 1, В). Върху тези илирски структури е наложена плитката Обзорска синклинала, образувана по-късно (пиренейски или савски деформации).

Присъствието освен на алохтонна (преотложена), така и на автохтоннна морска фауна, доказва седиментирането на конгломератите в морска среда. Останалите литолого-структурни белези обаче показват алувиален произход. Най-вероятно подхранването е ставало от река с водосборен басейн, включващ дълбоко денудирани (до нивото на хипоабисалните интрузиви) части от Средногорието и Източния Балкан, която се е вливала във вдаден на юг залив на късноеоценското море, заемащо Долнокамчийската падина на север.

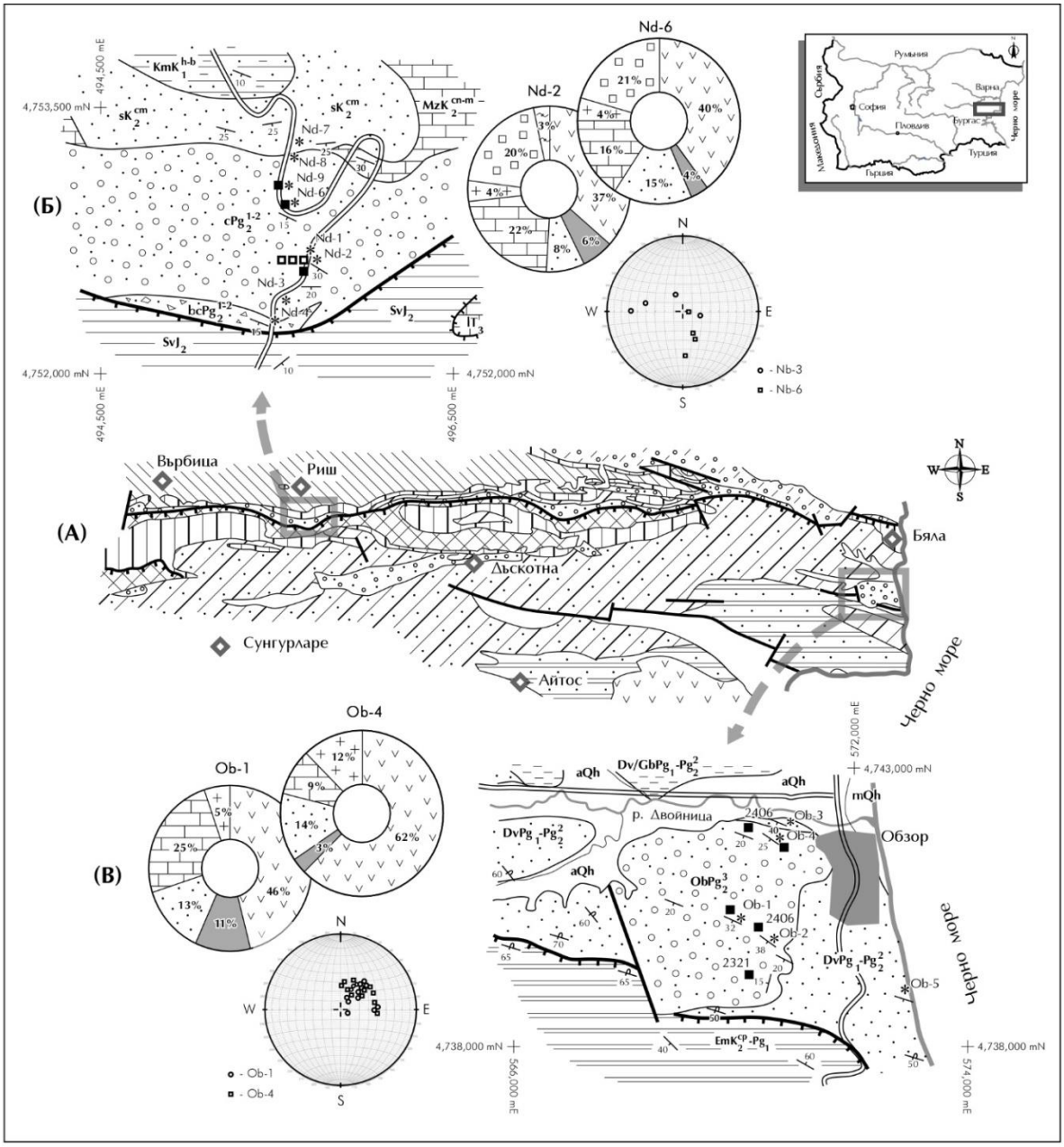
Обект на изследване в площ Немой дере (фиг. 1, Б) е палеогенската конгломератна задруга (Кънчев, 1995a,b), разкриваща се северно от дислокацията на Чудните стени в т. н. „южна синклинална ивица", включваща в Източния Предбалкан Кипилово-Ришката синклинала (Бончев, 1971). Тази единица е отделена от Kockel (1927) под името „екзотични конгломерати", а напоследък е номинирана като Армерски член на Двойнишката свита (Вангелов и Синьовски, 2013). Задругата е изградена от наситени полигенни конгломерати с пясъчникови прослойки (фототаблица I, сн. 4-6). Макар и лошо сортирани, в конгломератите се наблюдава отчетлива слоестост. Направеният петрографски спектър на кластите показва наличие на вулкански скали (базалти, андезити, туфи, хидротермалнопроменени скали, епидозити), интрузивни скали (сиенити, диорити), карбонати (мергели и варовици), пясъчници, кварц и кварцити, гнайси. Процентното им съдържание е показано на фиг. 1, Б. Преобладават късове с размер до 5 cm. Рядко се срещат валуни (25-30 cm), а блокове с размери 1,5 m са изключение. Спойката е варовито-песъчлива. Дебелината на задругата е 400-500 m. Вкаменелости са намерени в Ришкия проход от Ackermann в преотложени късове от варовици и определени (Nummulites globules) от Pollak (1933). Всички автори приемат палеоцен-средноеоценска или долно-средноеоценска възраст за конгломератите пред фронта на дислокация Чудните стени (Бончев, 1971; 1972; Йовчев и др., 1971; Вангелов и Синьовски, 2013 и др.), с изключение на Кънчев (1995b), според който те са следлютески.

В северното крило на синклиналата, конгломератната задруга лежи трансгресивно върху различни нива на горната креда (фиг. 1, Б). В южните си разкрития тя се възсяда от средноюрските седименти на Синивирската свита по дислокацията на Чудните стени. Тук на картата на Кънчев (1995a) е показана една лещообразна пластина от Мездренската свита, „защипана" между Синивирската свита и конгломератната задруга (имбрикация, „люспа" от дислокацията на Чудните стени). При настоящото изследване е установено, че тя представлява леща от карбонатни брекчи, включени в конгломератната задруга. Брекчите се състоят от ръбести късове от сивобели варовици, ядчести варовици и варовици с черен флинт, с хаотична ориентировка на слоестостта (фототаблица I, сн. 7). Подобни скали изграждат северното бедро на синклиналата, където те са отнесени към Мездренската и Кайлъшката свити (Кънчев, 1995a).

Материал и методика

Теренната работа включва маршрутно изследване с описни точки, измерване на слоестостта, имбрикацията, определяне на петрографските спектри и опробване на конгломератните литотела. Взети са 4 проби от различни части на Обзорската свита и 6 проби от 3 локалитета на конгломератната задруга. На геоложката карта (фиг. 1, В) и в таблица 1 са показани и пробите на Джуранов и др. (1994).

Изследван е изкуствен шлих от скална маса, добита от коренни разкрития, като са опробвани тела от наситени конгломерати. Обемът на изходната проба е в рамките на 12-14 kg. Първоначално пробите са обработени на челюстна трошачка до отстраняване на псефитните късове. Останалата скална маса с обем не по-малко от 5 kg (около 3 l) е раздробена допълнително на валцова трошачка до фракция –1,0 mm. Пробите са обогатени до сив шлих чрез промиване във вода, при което са отделени и установените в тях златинки.



Фиг. 1. (А) Схематична геоложка карта (по Чешитев и Кънчев, 1989) с местоположение на площите „Немой дере" и „Обзор": (1-5) *Мезозой*: 1 - Триас и Юра; 2 – Долна Креда; 3 – вулканогенна Горна Креда; 4 – Горнокреден флиш; 5 – епиконтинентална Горна Креда; (6-7) *Палеоген*: 6 – Палеоцен – Среден Еоцен; 7 – Горен Еоцен: (а) конгломерати и (б) глинести пясъчници и мергели; (8) *Неоген и Кватернер*; (Б) Геоложка карта на площ „Немой дере" (по Кънчев, 1995а с допълнения): (9-13) *Мезозой*: 9 - Горен Триас: варовиков олистолит;10 - Средна Юра: Синивирска аргилитова свита; 11 - Долна Креда (Хотрив-Барем): Камчийска песъчливо-мергелна свита; 12 - пясъчникова задруга (Ценоман); 13 - Мездренска варовикова свита (Кониас-Мастрихт); (14-15) *Палеоген* (Долен-Среден Еоцен): 14 - конгломератна задруга; 15 - брекчоконгломератна пачка с ръбести класти от Мездренската свита; (С) Геоложка карта на площ „Обзор" (по Кънчев, 1995с с допълнения): (16) Горна Креда-Палеоцен: Еминска флишка свита; (17-19) Палеоген: 17 - пясъчлив флиш (Двойнишка свита - Палеоцен-Среден Еоцен); 18 - Гебешки глинесто-мергелен флиш (Долен-Среден Еоцен); 19 - Обзорска конгломератна свита (Горен Еоцен); (20-21) Кватернер (Холоцен): 20 - алувиални чакъли, пясъци, глини; 21 - морски пясъци; (22-28) Петрографски спектри: 22 – вулканити; 23 – гранити и диорити; 24 – гнайси; 25 – мергели и варовици; 26 – пясъчници; 27 – хидротермалнопроменени скали; 28 – кварцити; (29) - литостратиграфска граница; (30-32) тектонски граници: 30 –разсед и отсед; 31 – възсед; 32 - граница на олистолит; (33) слоестост: (а) нормална и (б) преобърната; (34) местоположение на описна точка; (35) местоположение на шлихова проба: (а) с доказано злато и (b) стерилна.

Резултати

Местоположението на описните точки, местата на опробване и резултатите са показани на фигура 1 и в таблица 1.

Добитият сив шлих от двата локалитета се различава както като количество, така и като степен на промяна на съдържащите се в него тежки минерали. В пробите от Обзорската конгломератна свита преобладава магнитната и електромагнитната фракция, докато присъствието на неелектромагнитна е твърде ограничено, а тежките минерали са относително свежи до слабо променени. В пробите от Армерския член на Двойнишката свита количеството на сивия шлих е много по-малко, а делът на трите фракции – магнитна, електромагнитна и немагнитна, относително равностоен. Част от тежките минерали тук са слабо до средно променени.

Наличие на разсипно злато се установи в общо 8 бр. Проби, от които 5 бр. от Обзорската конгломератна свита и в 3 бр. от Армерския конгломератен член на Двойнишката свита. Златинките са много дребни, предимно кръгли и плоски по форма, умерено до силно омачкани. Макроскопски не се установяват сраствания или запазени фрагменти от вместващата скала.

Таблица 1
База-данни за описните точки и пробите

Стратиграфска единица	Данни за пробата				Вид опробване	Брой знаци (златинки)
	Точка ID	Координати - UTM-WGS84		Литология		
		Изток	Север			
Площ "Немой дере"						
Конгломератна задруга (Pg_2^{1-2})	Nd-1	495513.65	4752699.54	ориентир "Крумовият мост"	-	-
	Nd-2	495508.08	4752650.15	полигенни конгломерати	шлих, п.с.	0
				пясъчници	шлих - Nb-2b	0
				късове от хидротермалнопроменени скали в полигенни конгломерати	шлих- Nb-2c	0
				едрокъсов "руслов" конгломерат	шлих - Nb-2d	1
	Nd-3	495499.69	4752617.97	полигенни конгломерати	-	-
	Nd-4	495481.61	4752588.21	варовикови брекчоконгломерати	-	-
	Nd-6	495488.16	4752977.32	полигенни конгломерати	шлих, п.с.	2
	Nd-8	495403.17	4753373.87		-	-
	Nd-9	495560.02	4753060.04		шлих	3
Синивирска свита (J_2)	Nd-5	495456.78	4752558.48	черни аргилити и пясъчници	-	-
Пясъчникова задруга (K_2^{cm})	Nd-7	495441.94	4753467.08	варовити пясъчници	-	-
Площ "Обзор"						
Обзорска свита (Pg_2^{2-3})	Ob-1	569760.29	4740340.02	полигенни конгломерати	шлих, п. с.	1
	Ob-4	570547.96	4741861.15		шлих, п.с.	2
	Ob-2	570409.97	4740065.21	конгломерати и пясъчници	шлих	2
	2406	570320.00	4740170.00		шлих	0
	Ob-6	569934.44	4741714.01	полигенни конгломерати и пясъчници	шлих	1
	2321	570140.00	4739350.00	конгломерати, пясъчници, мергели	шлих	2
	2350	570150.00	4741910.00	конгломерати	шлих	0
Двойнишка свита (Pg_1-Pg_2^2)	Ob-3	570699.61	4741997.78	пясъчници с конкреции	-	-
	Ob-5	572797.49	4739035.24	пясъчници	-	-

Обсъждане на резултатите

Присъствието на злато в предимно флишките седиментите на Източния Балкан и Предбалкан има екзотичен характер. Не случайно конгломератите, богати на класти от вулкански и интрузивни скали, са наричани „екзотични". Съвместното съжителство на златото с късове от вулкански и интрузивни скали (вкл. Хидротермално променени андезити и рудокласти (фототабл. I, 4) е косвено доказателство за генетичната им връзка (Джуранов и др., 1994; Йовчев, 2015 и др.). Пряката връзка е доказана в широко разпространените в Източното Средногорие горнокредни магмени скали и свързаните с тях рудни полета (Росенско, Зидаровско, Върлибряжко). Всички предходни автори (Джуранов и др., 1994; Кънчев, 1995b, d; Вангелов, 2001; Йовчев, 2015 и др.) са единодушни, че късовете от магмени скали в „екзотичните конгломерати" са именно от този регион. Допълнително доказателство е и наличието (макар и рядко) на късове от гнайси, най-вероятно от фундамента на Средногорския седиментно-вулканогенен комплекс. По-интересен е въпросът кога и как златото и магмените класти са се

озовали в северните склонове на Източна Стара планина, сред предимно флишки седименти, далеч от разположените им на юг (в Средногорието) коренни разкрития. Отговорът на този въпрос трябва да се търси в регионалногеоложките данни за формирането на Източните Балканиди. Според тези данни, в края на кампана започва етап (ларамийско-илирски) на компресия (Дабовски и др., 2009), който завършва в края на Лютеса. През този етап приключва магмената активност в Средногорието и започва интензивното му издигане и денудация. На север се формира Еминския флишки трог (Кампан-Палеоцен, „късни ларамиди" по Начев и Янев, 1980), който се трансформира в Кула-Обзорския моласов трог (Палеоцен-Среден Еоцен, „илириди" по Начев и Янев, 1980). Златоносната конгломератна задруга (Армерски член на Двойнишката свита) в южната синклинална ивица на Предбалкана е част от този трог, който се подхранва както от дълбоко денудираните Средногорски вулканити и хипоабисални интрузиви, така и от Еминския флиш. Той се деформира в края на Средния Еоцен (Лютеса), когато се формира гънково-навлачният строеж на региона. Следва етап на екстензия, който започва в края на Средния Еоцен и продължава през целия Горен Еоцен. Това е етап на колапс и формиране на наложени грабенови понижения в Източните Балканиди и съседните им региони (Люляково-Дъскотненския грабен, Бургаското понижение, Лудокамчийската депресия). Образуват се смесени, континентално-морски седименти, с груботеригенен характер. Формира се златоносната Обзорска конгломератна свита, която е най-вероятен темпорален корелат на основната пъстра задруга в Люляково-Дъскотненския грабен (Белмустаков, 1958) и Долночифлишката свита в Предбалкана.

Заключение

Потвърдена е златоносността на Обзорската конгломератна свита с 4 нови проби. Доказана е златоносността на конгломератната задруга (Армерски член на Двойнишката свита) в 3 проби.

Установено е, че „люспата" от „горнокредни варовици" пред фронта на дислокацията на Чудните стени в местн. Немой дере, „защипани" между Синивирската свита и конгломератната задруга представлява пролувиални палеогенски карбонатни брекчи, включени в последната.

Въз основа на данните за състава, златоносността, възрастта, петрографските спектри, загладеността и имбрикацията, е направена палеогеографска интерпретация за механизма и времето на образуване на злотоносните „екзотични" конгломерати, в контекста на формирането на Източните Балканиди.

Литература

Белмустаков, Е. Приабонът в долината на р. Луда Камчия. – *Изв. ГИ на БАН, 6,* 1958. - 15-105.

Бончев, Е. *Проблеми на българската геотектоника*. – Техника, София, 1971. – 203с.

Бончев, Е. *Геоложка карта на България*. – Географски атлас на Н.Р. България. – ГУГК, 1972. - 24-25.

Ботев, Б. Бележки върху геологията на най-източната част от Източна Стара планина. – *Изв. Ги на БАН, 2*, 1953. - 3-20.

Вангелов, Д., Д. Синьовски. Нови данни за разпространението, литологията и хроностратиграфския обхват на Двойнишката свита, Източна България. – *Год. СУ, 100, 1;* 2013. - 43-70.

Гочев, П. Геоложки наблюдения по Черноморското крайбрежие между устието на р. Камчия и н. Емине. – *Сп. БГД, 4, 3,* 1932. - 200-213.

Дабовски, Х., Б. Каменов, Д. Синьовски, Е. Василев, Е. Димитрова, И. Байрактаров. Горнокредна геология. – В: *Геология на България* (ред. Загорчев, И., Х. Дабовски, Т. Николов)., т. II, част 5, С., Изд. Марин Дринов, 2009. - 554–589.

Джуранов, С., Х. Пимпирев. Литостратиграфия на горната креда и палеогена в приморската част на Източна Стара планина. – *Сп. БГД, 30, 2,* 1989. - 1-18.

Джуранов, С. и др. *Доклад за резултатите от изпълнение на геоложка задача „Геоложко и геоморфоложко картиране в М 1:25 000 на част от Източния Балкан между н. Емине и с. Старо Оряхово*. Национален геофонд, IV-411, 1994. – 299с.

Йовчев, Д. Самородно злато и платина в речните наслаги от района на селата Горен чифлик и Дюлино, Източна Стара планина. – *Сп. БГД, 76, 2-3,* 2015. - 51-63.

Йовчев, Й. (ред.). *Тектонска карта на България в М 1:500 000*. – КГ. 1971.

Кънчев, И. *Геоложка карта на България в М 1:100 000, к. л. Сунгурларе.* – ВТС, 1995a.

Кънчев, И. *Обяснителна записка към геоложката карта на България, к. л. Сунгурларе*. - Геология и геофизика АД, ЕТ Аверс, 1995b. - 73 с.

Кънчев, И. *Геоложка карта на България в М 1:100 000, к. л. Долен чифлик*. – ВТС. 1995c.

Кънчев, И. *Обяснителна записка към геоложката карта на България, к. л. Долен чифлик*. – Геология и геофизика АД, ЕТ Аверс, 1995d. - 113 с.

Начев, И., С. Янев. Седиментните геокомплекси в България. С., Наука и изкуство, 1980, - 203с.

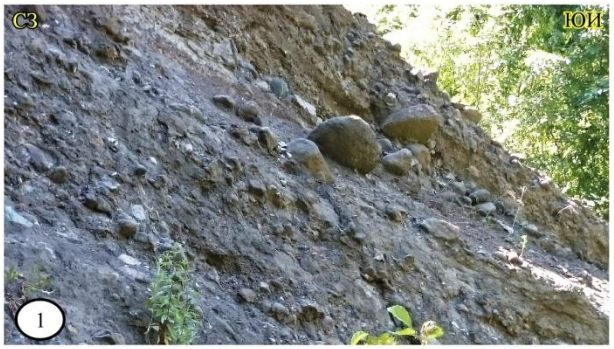
Синьовски, Д. Нови нанофосилни данни за възрастта на Еминската, Двойнишката и Обзорската свити в Източния Балкан. – *VI к-с на БГД*, 1996. - 90-91.

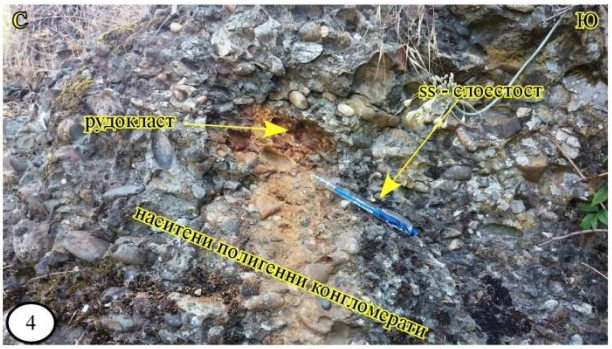
Чешитев, Г., Ил. Кънчев (ред.), *Геоложка карта на Н. Р. България*. – ВТС, 1989.

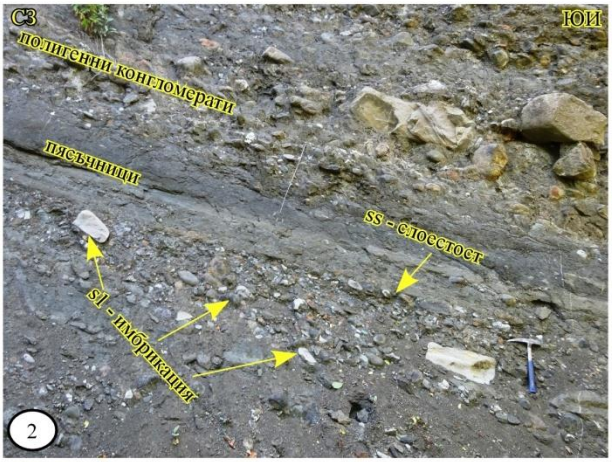
Kockel, C. W. Zur Stratigraphie und Tectonik Bulgariens. – *Geol. Rundsch., 18, 5*, 1927. - 349-395.

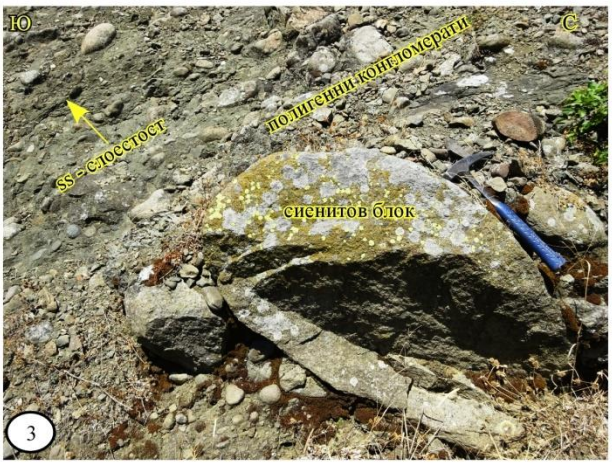
Pollak, A. Geologische Untersuchungen uber das Endstuck des Ostbalkan. – Abh. Sachs. Akad. Wiss., Math-phys. Kl., 4, 1933. – 1-60.

Статията е рецензирана от доц. д-р Ал. Здравков и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и геоинформатика".









Фототаблица I: (1-3) – фотографии на характерни разкрития на Обзорската свита в местн. Чекелеза: 1 – фрагмент от разкритието при т. Ob-1, 2 – детайл от същото разкритие, 3 – фрагмент от разкритието при т. Ob-4 (4-7) – фотографии на представителни разкрития на „екзотичните конгломерати" (Армерски член на Двойнишката свита) в местн. Немой дере: (4-6) – фрагменти от разкритието при т. Nd-2: 4- конгломерати с рудокласти, 5 – конгломерати и пясъчници, 6 – голям диоритов къс в конгломератите; 7 – карбонатни брекчи в конгломератната задруга.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

ПЪРВИ ЦИФРОВ МОДЕЛ НА МОРСКОТО ДЪНО НА ЮЖНОБЪЛГАРСКОТО ЧЕРНОМОРСКО КРАЙБРЕЖИЕ - ШИРОК БУРГАСКИ ЗАЛИВ

Тодор Ламбев, Любомир Димитров

Институт по океанология "Фритьоф Нансен", БАН, 9000 Варна, totolamb@abv.bg, geos@io-bas.bg

РЕЗЮМЕ. Съставеният цифров модел на морското дъно в акваторията на южнобългарското черноморско крайбрежие – широк Бургаски залив (от н. Емине до н. Маслен нос), е резултат от обработката и сглобяването на данни: от еднолъчев ехолот и многолъчеви сонарни системи, получени от Института по океанология към БАН в гр.Варна; от батиметричен лидар; предоставени от пристанищните власти и от дигитализиране на изобати от морски навигационни карти. Данните от еднолъчевия ехолот и многолъчевите сонарни системи са придобити по време на изпълнението на различни национални и международни проекти на ИО-БАН. В участъците, за които няма данни, е направено ръчно допълване на изобатите, построени въз основа на околния релеф и кръгова интерполация със стъпка 55 m. От съвместяването на всички данни е съставен цялостен 3D модел на релефа на морското дъно с резолюция на модела от 1/64 минута по паралела или размер на клетката от 29 m. Цифровият модел позволява детайлното разчитане на дънния релеф по цялата си площ и с успех може да се използва при съставянето на високо точни, дребномащабни навигационни карти и за изучаване на геоморфологията на морското дъно. Цифровият модел е съставен в изпълнение на проект EMODNet Bathymetry финансиран от ЕС и е включен в европейската базата хидрографски данни.

Ключови думи: цифров модел, морско дъно, Бургаски залив, континентален шелф, морфоложко зониране, многолъчева сонарна система

FIRST DIGITAL TERRAIN MODEL OF THE SEABED OF SOUTH BULGARIAN BLACK SEA COAST - BROAD BOURGAS BAY

Todor Lambev, Lyubomir Dimitrov
Institute of oceanology "Fridtjov Nansen", BAS, 9000 Varna, totolamb@abv.bg, geos@io-bas.bg

ABSTRACT. Composite digital terrain model of the seabed in the waters of the southern Bulgarian Black Sea coast - broad Burgas Bay (from Cape Emine to Cape Maslen nos) is the result of processing and assembling data from single beam echosounder and multibeam sonar systems derived from the Institute of Oceanology-BAS, bathymetric LiDAR data, data provided by the port authorities and data from digitizing water lines from marine navigational charts. Data from single beam echosounder and multibeam sonar systems were acquired during the implementation of various national and international projects of IO-BAS. Areas for which no data are available were completed by manually drown isobaths built on the grounds of the surrounding terrain and circular interpolation with step of 55 m. By combining all the data a comprehensive 3D digital terrain model of the topography of the seabed with resolution of 1/64 arc minute or cell size of 29 m was created. The digital terrain model allows detailed understanding of the seafloor morphology and with success can be used in the compilation of highly accurate, small-scale navigational charts and study of the geomorphology of the seabed. The digital model was made under implementing the project EMODNet Bathymetry funded by the EU and is included in the European hydrographic data base.

Keywords: Digital model, sea bottom, Burgas bay, continental shelf, morphological zones, multibeam echo sounder systems

Въведение

Крайбрежната зона в световен мащаб изпитва все по-голям антропогенен натиск от дейности като строителство, морски трафик, туризъм, промишлен риболов и други причини. Всяка една от тези дейности създава уникални изисквания за наличие на надеждни данни, за картографиране, за нуждите на планирането и управлението на крайбрежните зони включващи:

- строителни проекти за туризма, жилищното настаняване и промишленост имат нужда от дигитални модели на прехода земя - море за планиране на сгради, пристани, пристанища, рибарство, тунели и мостове;
- търговският и спортният морски трафик изисква добри навигационни карти, които покриват открити водните площи и в близост до брега;
- устойчиви, алтернативни енергийни източници създават необходимостта от карти и модели за изследване на идеалната позиция на подводни турбини и вълнови електрогенератори;
- изменението на климата изисква изследване на въздействието от повишаването на морското равнище. Цифрови модели на терена (ДТМ) на крайбрежната зона се използват за симулиране на степента на покачване на водните нива и моделиране на сценарии на наводнения;
- плановете за управление на крайбрежните зони и екологични наблюдения разчитат на актуална информация за управлението на бедствия и риска, като наводнения и цунами. Това води до чести актуализации и бързо внедряване на измервателни системи на ефективно и точно записани промени.

Настоящият доклад е фокусиран върху създаването на цифров модел на морското дъно (ЦМР) в акваторията на южнобългарското черноморско крайбрежие – широк Бургаски залив (от н. Емине до н. Маслен нос).

Обхват на съставеният модел

Съставеният цифров модел на морското дъно покрива част от акваторията на южнобългарското черноморско крайбрежие – широк Бургаски залив, а именно от н. Емине до н. Маслен нос. Изследваният участък обхваща площ с размер приблизително 950 km^2 (фиг. 1). Дълбочините в определения участък достигат до -50 m в дълбочина.

Изборът на района е направен на база максимален брой налични данни, с цел получаване пълен цифров модел на дъното със стъпка от 29 m.

Използвани данни

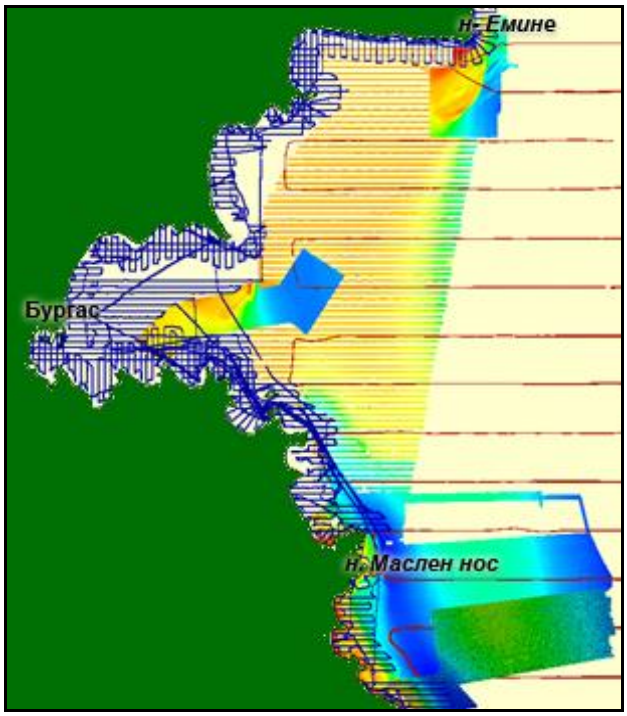
За изготвянето на цифровия модел на черноморското дъно, освен архивни данни от Фонда на Института по океанология, са използвани и първични данни от еднолъчево ехолотиране, картиране с многолъчева сонарна система (МСС) със 100% покритие, данни от въздушен батиметричен LiDAR, данни, предоставени от пристанищните власти и навигационни морски карти.

Чрез въздушно лазерно сканиране (LiDAR) са осигурени данни за район с обща площ в акваторията от около 100 km^2 по проект на Центъра за подводна археология в гр. Созопол. Акваторията, сканирана с LiDAR в този участък, достига до дълбочини между –16 и –21 m, какъвто е капацитетът на лазерната технология при условията на Черно море. Използвана е системата HawkEye II, позволяваща създаването на ЦМР за водна среда, със стъпка от 5 m (Прахов, Н., … 2011. Прогнозно моделиране в археологията: световна практика и български перспективи).

През 2009 г., във връзка с проектирането на нефто-провод Бургас - Александруполис, е извършено комплексно изследване на морското дъно, включващо и батиметрично картиране. Акваторията е картирана с многолъчева сонарна система RESON7111 (100 KHz), допълнена със сензори за движение MRU IXSEA Phins, навигационна система DGPS (Trimble SPS351) и високо точен жирокомпас. Получените данни са обработени с програмния продукт PDS2000 (Teledyne PDS – User Manual, 2015) и е получен цифров модел на дъното с размер на клетката от 2 m (Отчет по задача "Комплексно геолого-геофизично проучване на трасе за полагане на тръбопровод "Бургас - Александруполис" в българската част на Черно море", 2009).

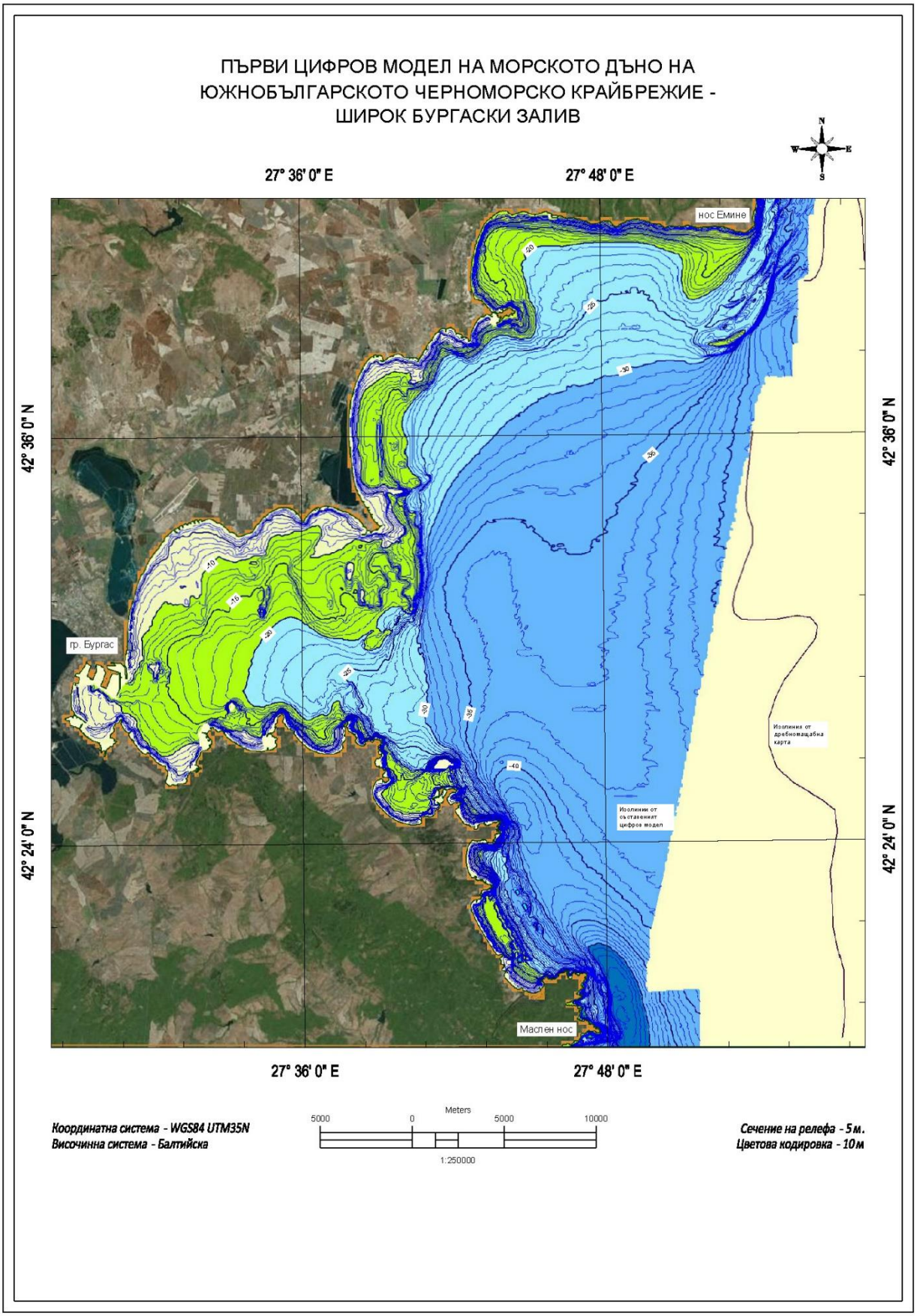
През 2011 г. по проект "НАТУРА 2000", възложен от МОСВ на ИО-БАН гр. Варна, е извършено комплексно изследване на морското дъно в различни участъци от българското Черноморие. Един от тези участъци е районът около нос Емине. Акваторията е картирана с многолъчева сонарна система RESON7111 (100 KHz), допълнена със сензори за движение MRU IXSEA Phins, навигационна система DGPS (Trimble SPS351) и високо точен жирокомпас. С цел подобряване на резултатите, е включен и сензор за RESON SVP 20T, следящ промените в скоростта на разпространение на звука във водна среда. Получените данни са обработени с програмния продукт PDS2000 (Teledyne PDS – User Manual, 2015) и е получен цифров модел на дъното с размер на клетката 2 m (Отчет по задача „Разширяване на екологичната мрежа НАТУРА 2000 в българската черноморска акватория", 2012).

През 2013г., по проект "Towards Coast-to Coast NETwork of marine protected areas coupled with sea-based energy potential (CoCoNET)", финансиран по 7РП на ЕС, е извършено комплексно изследване на морското дъно в участък южно от нос Колокита – южно Българско Черноморие. Акваторията е картирана с многолъчева сонарна система RESON 7111 (100 KHz), допълнена със сензори за движение MRU IXSEA Phins, навигационна система DGPS (Trimble SPS351), високо точен жирокомпас и сензор за скоростта на звука във водна среда RESON SVP 20T. Получените данни са обработени с програмния продукт PDS2000 (Teledyne PDS – User Manual, 2015) и е получен цифров модел на дъното с размер на клетката 5 m (Todorova et al., 2015; The CoCoNet Guidelines…, 2016)



Фиг. 1. Схема на изследвания район с местоположението и типа на наличните данни

През 2013 г. МОСВ на Република България възлага на ИО-БАН изготвянето на „Доклад оценка на екологичното състояние на морските води (РДВ)" (Станчев и кол., 2013). Извършено е батиметрично заснемане с еднолъчев ехолот на морските води на Република България (линии през 500 m., напречно на бреговата линия) и батиметрично заснемане на крайбрежната зона с многолъчева сонарна система RESON 7111 (100 KHz), допълнена със сензори за движение MRU IXSEA Phins, навигационна система DGPS (Trimble SPS351), високо точен жирокомпас и сензор за скоростта на звука във водна среда RESON SVP 20T. Получените данни са обработени с програмния продукт *PDS2000* (Teledyne PDS – User Manual, 2015) и е съставен цифров модел на дъното с размер на клетката 5 m.



Фиг. 2. Батиметрична карта на изследвания район, построена на базата на съставения ЦМР.

Обработка на използваните данни

За съставянето на възможно най-пълен цифров модел на дъното са използвани различни по тип изходни графични данни, които включват ортофото- и сателитни изображения, разномащабни сканирани карти, картосхеми и планове, ГИС слоеве, цифрови модели на височините, батиметрични контури и други.

Получените изходни данни представляват различна по вид информация (векторна и растерна). Според характера на измервателната техника, обработката също е различна.

За обработката на данни от еднолъчева и многолъчева сонарни системи е използван софтуер PDS2000. Данните, получени от всеки отделен проект са заредени като „сурови данни“, с цел създаването на общ по-точен модел. Дигитализирани са изобати от различни карти с разнообразни мащаби. За визуализирането на получените резултати е избрана програмата *Global Mapper 14*.

Цифров модел на дъното

Цифровите модели на терена (ЦМР) осигуряват информационната основа за пространствени анализи и картографиране, както на сушата, така и на акваториите. Мащабът на визуализация е ограничен от наличието на качествени изходни данни, необходими за създаването им и преди всичко от плътността на цифровите модели на терена. Чрез манипулирането на ЦМР в ГИС среда са създавани модели, които симулират различни ситуации и хипотези. Те дават възможност за ясно визуализиране и представяне на резултатите от проучванията. Чрез ГИС са създавани различни варианти на карти и цифрови теренни модели, според нуждите на изследването и на потребителя. Възможностите за виртуална работа в ГИС са многобройни и разностранни, като мнението на водещите специалисти в тази област е, че те са ограничени единствено от фантазията и уменията на потребителя.

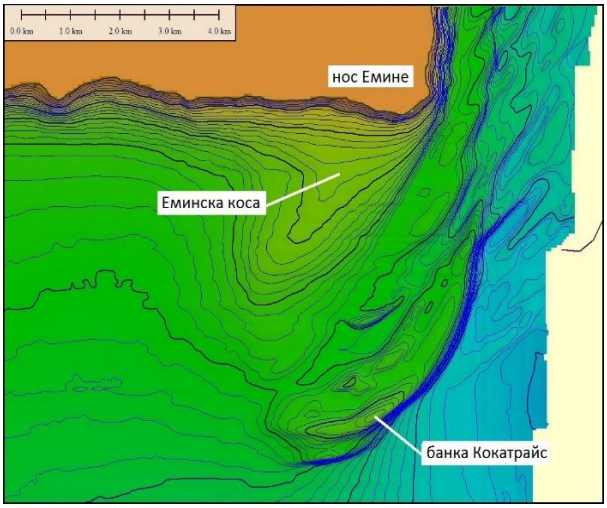
Векторният тип данни е съставен предимно от преки измервания през годините. За местата без данни от измервания са използвани допълнителни източници (карти, сателитни изображения и др.). Въпреки това, българското черноморско крайбрежие не е напълно обследвано и остават места, за които е необходимо да се изпълни интерполация. Избран е методът на кръговата интерполация с радиус на запълване от 50 m, осигуряващ резултати, максимално близки до реалните, въз основа на наличните данни.

От съвместяването на всички данни е съставен цялостен 3D модел на релефа на морското дъно, с резолюция от 1/64 минута по паралела или размер на клетката от 29 m. Създаденият цифров модел, в рамките на докторската програма, е приведен в единна картна проекция UTM 35N, с геодезичен датум WGS 84. Дълбочините са във височинна система „средно многогодишно морско ниво“ за българското крайбрежие. От теренния модел са извлечени батиметрични контури през 1 m (Ingham, 1993).

Интерпретация и резултати

Цифровият модел позволява детайлното разчитане на дънния релеф по цялата си площ и с успех може да се използва при съставянето на високо точни, дребномащабни навигационни карти, както и за изучаване на геоморфологията на морското дъно. Цифровият модел е съставен в изпълнение на проект *„EMODNet Bathymetry“*, финансиран от ЕС и е включен в европейската база хидрографски данни.

За пример е използван районът около нос Емине (фиг. 3). Ясно се различават Еминска пясъчна коса (в сянката на носа) и Банка Кокатрайс (южно от пясъчната коса).



Фиг. 3. Извадка от цифровия модел на Черноморското крайбрежие

Изводи и заключения

Понастоящем съществуват различни технологии за картиране на морското дъно - от аналогови системи до цифрови, високоточни дистанционни технологии, които през последните години се развиват изключително бързо. Това води до съществуването и едновременното използване на някои от тях. В представения случай са съвместени данни, получени от различни източници на дистанционни измервания (въздушно лазерно сканиране, еднолъчеви и многолъчеви сонарни системи, навигационни карти и ортофото снимки). Те са съпоставени с по-стари данни от батиметрични карти, като за целта е създаден дигитален теренен модел (ДТМ). 3D моделът, с размер на клетката от 29 m, позволява детайлно разчитане дънния релеф по цялата му площ. Това го прави подходящ за употреба при изучаване морското дъно от различни специалисти и особено важно за корабоплаването.

Литература

Прахов, Н., Хр. Ангелова, А. Коцев, А. Попов, С. Димитров, Прогнозно моделиране в археологията: световна практика и български перспективи. - *Bulgarian e-Journal of Archaeology, v.1,* 2011. - 71-121

Ingham, A.E. Hydrography for the surveyor and Engineer. Wiley-Blackwell, ISBN 13: 9780632029433, 1993, -274p.

The CoCoNet Guidelines. SCIRES-IT (SCIentific RESearch and Information Technology), Supplement 2016 e-ISSN 2239-4303, 2016. -93p.

Teledyne PDS – User Manual. 2015, (достъпен на http://geo-matching.com/upload/228-3390-5815.pdf)

Todorova, V., L., Dimitrov, V., Doncheva, E., Trifonova, B., Prodanov. Benthic Habitat Mapping in the Bulgarian Black Sea. - In: *Proceedings of 12th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 2015)*, vol. 1, Varna, 97-605-85652-4-1, 2015. - 251-262.

Фондови материали:

Отчет по задача "Комплексно геолого-геофизично проучване на трасе за полагане на тръбопровод “Бургас-Александрополис” в българската част на Черно море", 2009, дог. 09_08-01 “ГеоТим” ООД, Италия, Научен фонд на ИО-БАН, 2009.

Отчет по задача „Разширяване на екологичната мрежа НАТУРА 2000 в българската черноморска акватория", 2012. дог. 7976 / 04.04.2011 МОСВ Научен фонд на ИО-БАН, 2011.

Станчев, Хр., Ил. Щирков, В. Панайотов, Я. Веков, Л. Димитров, В. Дончева, Е. Борисова, Б. Проданов, А. Апостолов, О. Янев, П. Петров. Батиметрия. - Доклад оценка на екологичното състояние на морските води (РДВ). Договор № 0-33-18 / 12.06.2013, Научен фонд на ИО-БАН, 2014. - 6-41.

Статията е рецензирана от доц. д-р Калин Русков и препоръчана за публикуване от кат. „Геология и проучване на полезни изкопаеми”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ГЕОЕЛЕКТРИЧЕН ПОДХОД ПРИ ТЪРСЕНЕ НА ОКАРСТЕНИ ЗОНИ И ПЕРСПЕКТИВНИ УЧАСТЪЦИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ВОДОДОБИВНИ СОНДАЖИ

Стефан Димовски, Николай Стоянов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; e-mails : dimovski@mgu.bg, nts@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Предложеният геоелектричен подход за локализиране на окарстени зони се базира на различията в елекросъпротивителните свойства на тези зони и неокарстените здрави части на скалния масив. По същия признак, с голяма достоверност, в подповърхностното пространство се диференцират и зони с различна водоносителност и водообилност, което е много важен ориентир при търсенето на перспективни участъци за изграждане на вододобивни сондажи. Голямата ефективност на предложения подход за картиране на окарстени и по-водообилни зони е илюстрирана с резултатите от проведеното електротомографско проучване в района на с. Арбанаси, Великотърновска област. Представените резултати потвърждават приложимостта на използваната методика на измерване, анализ и интерпретация на данните.

A GEOELECTRICAL APPROACH FOR SEARCHING KARST AREAS AND PROMISING SITES FOR CONSTRUCTION OF WATER WELLS

Stefan Dimovski, Nikolay Stoyanov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; dimovski@mgu.bg, nts@mgu.bg

ABSTRACT. The proposed geoelectrical approach for localization of karst areas is based on the different electrical resistivity properties of these zones in comparison to those of the unchanged parts of the rock massif. The same characteristic can be applied with high credibility for the differentiation of sub-surface areas with different water saturation and water abundance, which is a very important benchmark in the search for promising sites for construction of water wells. The high efficiency of the proposed approach for mapping karst and more prominent zones is illustrated by the results of the performed electrical tomography study in the area of Arbanasi, Veliko Tarnovo region. The presented results confirm the applicability of the proposed methodology for measurement, data analysis and interpretation.

Въведение

За детайлното картиране на приповърхностния геоложки разрез освен традиционните сондажни методи успешно се използват и геофизични методи. При традиционните методи получаваната информация е едномерна, тъй като проучванията са точкови (опробване на ядка от сондажите) или чрез изследване на целия дълбочинен интервал, пресечен от сондаж (най-често чрез каротажни методи). Качеството (достоверността) на тази информация е свързано главно с методически, технически и технологични грешки, обуславяни от процеса на вземане на пробите, тяхното транспортиране, съхраняване и подготовка за лабораторните експерименти.

Предимството на геофизичните методи се обуславя от възможностите за получаване на данни от непрекъснати последователности за определени интервали или обеми в пространството или в определени периоди от време. При това получаваната информация е за естествени условия на разположение на скалите и се осигурява двумерно (2D) и тримерно (3D) изследване на геоложкия разрез.

Електротомографията намира все по-широко приложение за картиране на приповърхностния геоложки разрез. Това е метод, който бързо се развива през последните две десетилетия и се базира върху използването на съвременна апаратура, оптимална методика на измерване и компютърна обработка на данните. (Griffiths, Barker, 1993; Loke, Barker, 1996).

Регистрираното разпределение на специфично електрично съпротивление в подповърхностното пространство е еднозначно отражение на степента на проява на йонна електропроводимост (Daniels, Alberty, 1966). Анализът на установените геоелектрични разрези е добра основа за по-точна и детайлна количествена оценка на геоложките, хидрогеоложките и инженерногеоложките условия на изследваната част от природната среда.

Проведените от нас изследвания през последните 10-15 години ни убедиха в безспорните предимства на електротомографските методи за детайлно изучаване на приповърхностния геоложки разрез. Комплексното им прилагане с различни други методи и техники дава възможност за много по-прецизно диференциране и пространствено картиране на границите на геоложки или хидрогеоложки единици, окарстени или напукани зони; тектонските нарушения, зони с различна водоносителност и водообилност, зони с различна степен на техногенно или природно замърсяване, свлачищни участъци, археологически обекти и др. (Стоянов 2003, 2004; Стоянов и Гюров 2004; Стоянов и др., 2004; Димовски и др., 2007, 2012;

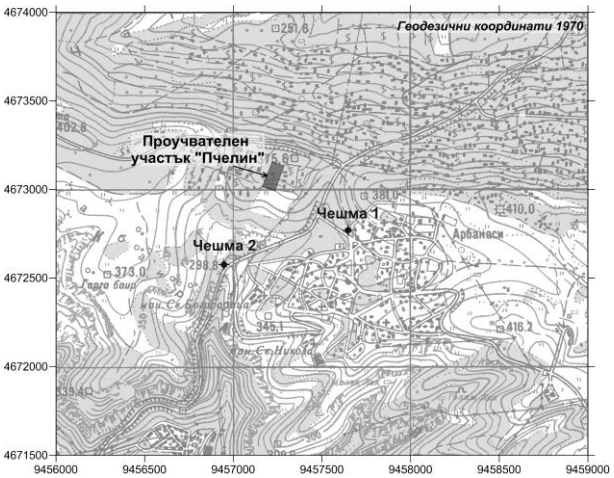
Dimovski et al., 2008; Димовски, 2010; Димовски и Стоянов, 2010, 2011 и други).

Приложимостта на електротомографията при картиране на окарстени зони в подповърхностното пространство ще илюстрираме с представените по-долу резултати от изпълненото от нашия екип електротомографско проучване в района на с. Арбанаси.

Кратка информация за изследвания обект

Обект на изследване е карстовият слабоводоносен комплекс в землището на с. Арбанаси (фиг. 1).

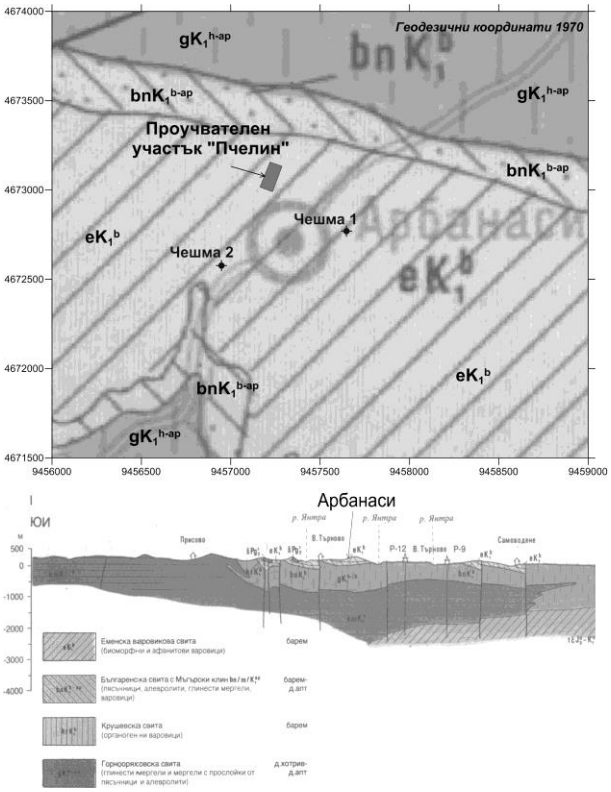
Геоложкият строеж на района е сравнително прост. В горната част на разреза доминират долнокредните седименти от състава на Еменската варовикова свита (eK1b) (фиг. 2) (Кожухаров и др., 1992). Представени са от светли, порцелановидни, финозърнести до афанитови карбонатни скали. По състав и структура се отнасят към биодетритусните фораминиферни микрозърнести до кристалинни варовици. Дебелината на тази свита в околностите на с. Арбанаси варира от 20 до 50-60 m и повече. За карбонатния комплекс са характерни различни по тип и размер карстови форми (кухини и канали), част, от които се разкриват на земната повърхност. В окарстените варовици е формиран слабоводоносен и с ограничени ресурси комплекс, който е единствен източник за добив на подземни води в района на с. Арбанаси.



Фиг. 1. Местоположение на проучвания участък

Еменската варовикова свита (eK1b) лежи върху скалите на Българенската теригенна свита (bnK1b-ap), в състава, на която преобладават пясъчниците, а мергелите имат подчинено значение. Теригенните скали са относително здрави до слабо напукани, практически неводоносни.

Окарстените карбонатни скали на Еменската варовикова свита (eK1b) са частично припокрити от кватернерни делувиални глини, чиято дебелина е в границите от 1-2 до 7-8 m и повече.



Фиг. 2. Геоложка карта на района

Основна водоносна структура в района на с. Арбанаси е подземно водно тяло ПВТ BG1G0000K1040 „Карстови води в Ловеч-Търновския масив“ (фиг. 3). В проучваната територия това водно тяло представлява карстов басейн с доста ограничена площ и неголяма дебелина, което предпоставя и сравнително малки ресурси на подземни води. Подземните води са безнапорни. Подхранването е от инфилтрация на падналите валежи (дъжд и сняг). Дренирането е от малък брой низходящи и преливни извори, дренират се главно по периферията на басейна. Дебитът на изворите варира от 0,01 до 0,3 l/s. Част от тях са каптирани и са изградени чешми. Средният модул на подземния отток е 0,9 (l/s)/km^2. Шахтовите и сондажните кладенци обикновено имат малък относителен дебит – около 0,01-0,05 l/s, а често и много по-нисък.

Фиг. 3. Хидрогеоложка карта

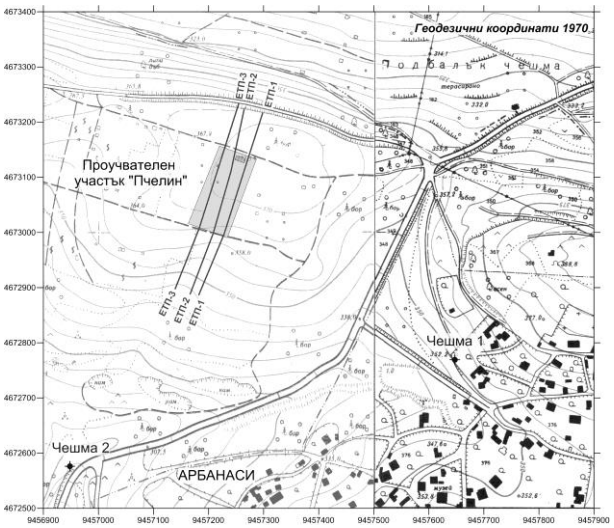
Цели на проучването

Главни цели на електротомографското проучване са:

- детайлизиране на геоложкия разрез до дълбочина 70-80 m;
- картиране на окарстени зони и кухини в изследвания геоложки разрез;
- очертаване на зони с различна водонаситеност и водообилност;
- уточняване на местоположението на подходящи участъци за изграждане на вододобивни сондажи.

Методика и инструменти на изследване

Използваният електротомографски метод е подходящ за двумерно картиране на приповърхностния разрез във вертикални разрези по профили. Теренните измервания са изпълнени посредством голям брой свързани към многожилен кабел електроди (Griffiths et al., 1990). Използвана е 4-електродна схема Schlumberger. Регистрацията е извършена с помощта на апаратура Terrameter SAS 1000 B, производство на шведската фирма ABEM. Тя работи с изходно напрежение 150 V и максимален изходен ток 1000 mA. Състои се от предавател, приемник и микропроцесор, обединени в едно тяло. Принципът на измерване включва натрупване на сигнала с последователни измервания и аналогово филтриране, като резултатите се извеждат на дисплей. Това позволява да се контролира процесът на измерване и да се подтискат по избор 2, 4 и 8 пъти статистически разпределени шумове в приемната верига. По този начин се постига по-висока точност на измерванията, която е особено необходима при работа с по-слаби сигнали.



Фиг. 4. Местоположение на геофизичните профили

Теренните измервания са изпълнени по три профила, всеки, от които с дължина по 350 m. Използвани са две коси от 12 жилен кабел с разстояние между електродите 10 m (общо 24 електрода на разстановка). След измерване на всяка разстановка, се извършва стъпковото преместване ("приплъзване") на кабела със стъпка 120 m. Профилите са ситуирани успоредно един на друг. Точното им местоположение е представено на фигура 4.

При обработката на полевите данни е използвана компютърната програма RES2DINV (Loke, 2001). Програмата дава разрез на реалното разпределение на електричните съпротивления. Преходът от геоелектричен разрез в геоложки, инженерногеоложки или хидрогеоложки модел се прави като при последващата интерпретация на получената с програмата геоелектрична картина се отчита и събраната при стандартното проучване информация за конкретните природни условия.

В представения случай, поради липса на сондажни проучвания и други данни за по-прецизно корелиране на регистрираните геоелектрични разрези, съставеният геоложки модел и отделените в него граници притежават известна условност.

Анализ на геоелектричните разрези. Геоложка интерпретация

Данните от полевите електротомографски измервания са интерпретирани с компютърна програма RES2DINV и е детерминирано разпределението на действителните съпротивления в подповърхностното пространство. Получените по трите електротомографски профила геоелектрични разрези (ЕТП-1, ЕТП-2 и ЕТП-3) са илюстрирани на фигури 5, 6 и 7.

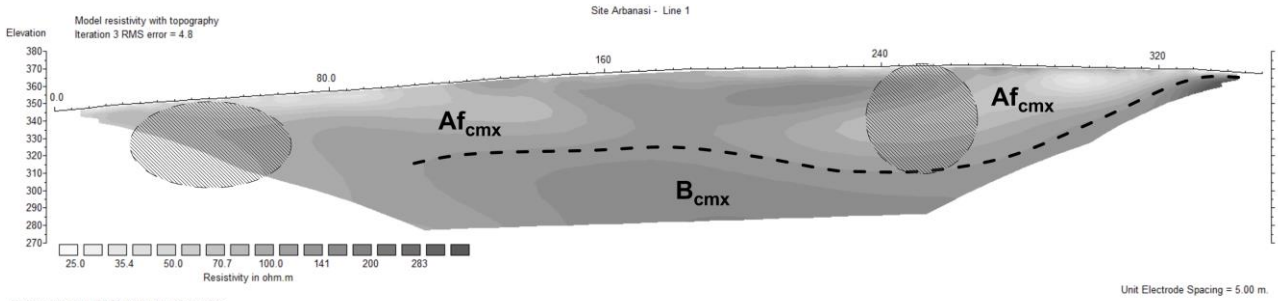
Анализът на съставените геоелектрични разрези позволява да се направят следните по-важни изводи:

● Геоелектричният разрез по четирите профила е относително добре издържан по разпределението на електричното съпротивление в дълбочина.

● Електричното съпротивление на разновидностите (средите), които изграждат изследвания разрез свидетелства за присъствие на подчертано изразена йонна проводимост. Стойностите на електричното съпротивление са ниски и варират в относително широки граници – от 5 Ωm до около 400 Ωm и повече.

● Геоелектричният разрез по профили ЕТП-1, ЕТП-2 и ЕТП-3 е представен от две елекросъпротивителни среди, които картират зони с различен литоложки състав, окарстстеност, водонаситеност и степен на водообилност:

<u>Първата електросъпротивителна среда</u> – Зона Af_{cmx} се характеризира със сравнително ниски стойности на електричното съпротивление – най-често в диапазона от 20 Ωm до 130 Ωm. Дебелината й варира в границите от 15-20 до 50-65 m. Зона Af_{cmx} вероятно картира варовиците на Еменската варовикова свита, в които е формиран слабо водоносен карстов комплекс, представляващ една много малка част от ПВТ BG1G0000K1040. Наличието на аномални нискоомни зони в тази елекросъпротивителна среда предполага окарстени и относително по-водообилни зони (участъци). Част от тези зони, отбелязани на получените геоелектричните разрези по профили ЕТП-1, ЕТП-3 и ЕТП-3 (фиг. 5, 6 и 7), както и на топографската карта, представена на фигура 8, могат да се разглеждат като перспективни участъци за изграждане на сондажи за добив на подземни води.



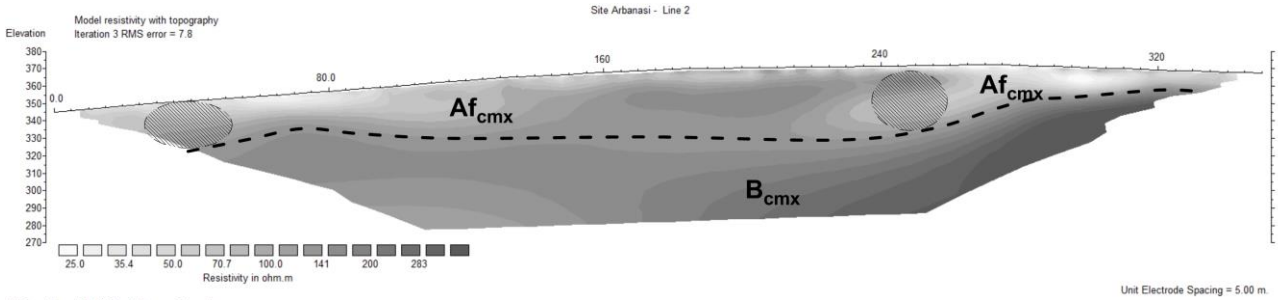
Horizontal scale is 22.69 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.50
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 350.0 m.

Зона Af$_{cmx}$ (от 20 до 130 ohm.m) - слабо водоносен карстов комплекс

Зона B$_{cmx}$ (от 130 до 400 ohm.m) - неводоносен скален комплекс

- перспективни зони (участъци) за изграждане на сондаж

Фиг. 5. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 1



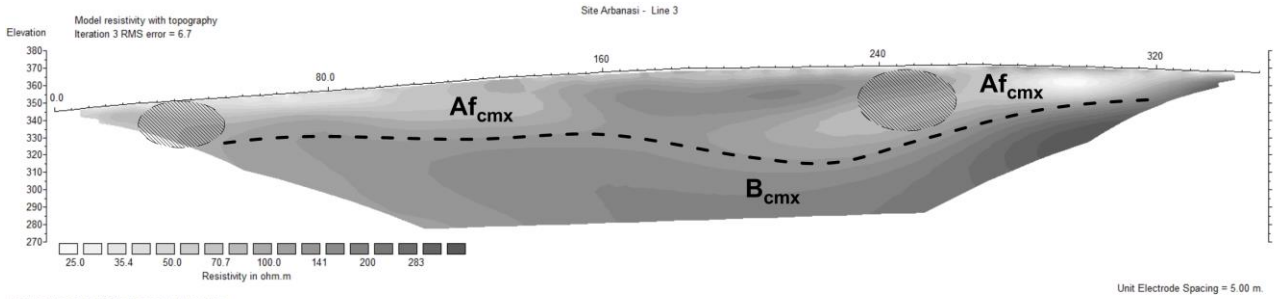
Horizontal scale is 22.69 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.50
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 350.0 m.

Зона Af$_{cmx}$ (от 20 до 130 ohm.m) - слабо водоносен карстов комплекс

Зона B$_{cmx}$ (от 130 до 400 ohm.m) - неводоносен скален комплекс

- перспективни зони (участъци) за изграждане на сондаж

Фиг. 6. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 2



Horizontal scale is 22.84 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.50
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 350.0 m.

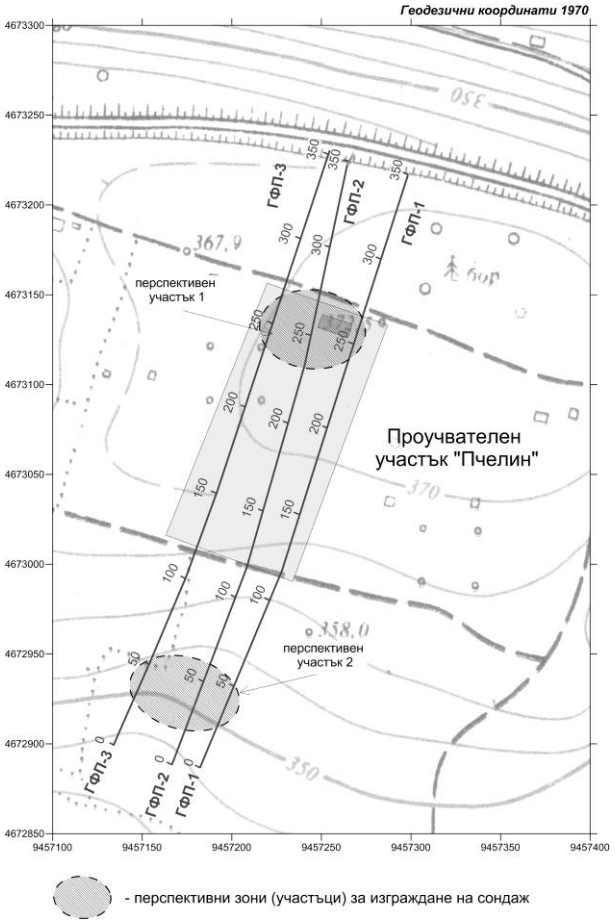
Зона Af$_{cmx}$ (от 20 до 130 ohm.m) - слабо водоносен карстов комплекс

Зона B$_{cmx}$ (от 130 до 400 ohm.m) - неводоносен скален комплекс

- перспективни зони (участъци) за изграждане на сондаж

Фиг. 7. Разпределение на електричното съпротивление в разреза по Профил 3

Втората електросъпротивителна среда – Зона B_{cmx} се характеризира с по-високи стойности на електричното съпротивление – най-често в диапазона от около 130 Ωm до 400 Ωm и повече. Тази електросъпротивителна среда маркира разпространението на скалите от Българенската теригенна свита (пясъчници и мергели), които се разглеждат като много слабо проницаеми и практически неводоносни.



Фиг. 8. Площна карта на границите на окарстените зони. Зониране на перспективни участъци за изграждане на сондажи за добив на подземни води.

Перспективни зони за сондиране

Комплексният анализ на резултатите от проведените електротомографски и георадарни проучвания дава основание да се направят следните по-важни констатации:

● В геоелектричните разрези по трите профила (ЕТП-1, ЕТП-2 и ЕТП-3) са картирани границите на органогенните варовици от състава на Еминската варовикова свита. В проучваната площ дебелината на тези варовици варира в диапазона 15-20 до 50-65 m.

● Във варовиците е формиран слабо водоносен карстов комплекс, който може да се разглежда като една много малка част от подземно водно тяло ПВТ BG1G0000K1040. В землището на с. Арбанаси и прилежащите му територии това водно тяло има ограничена площ и неголяма дебелина, което предпоставя и сравнително малки ресурси на подземни води.

● Регистрираните аномални нискоомни зони в геоелектричните разрези по проучвателни профили ЕТП-1, ЕТП-2 и ЕТП-3 маркират окарстени и относително по-водообилни зони (участъци) (фиг. 5, 6 и 7). Две от тези зони, които са отбелязани и на топографската карта на фигура 8, могат да се разглеждат като перспективни участъци за изграждане на сондажи за добив на подземни води.

● С оглед на установения геоелектричен разрез и съществуващите геоложки и хидрогеоложки условия се препоръчва проучвателните сондажи в перспективните участъци да са с дълбочина около 70-80 m.

Заключение

Съставеният въз основа на комплексния анализ и интерпретация на резултатите от електротомографията хидрогеоложки модел, при отчитане на съвсем ограничената информация за геоложкия строеж на проучвания участък, дава относително добра представа за възможните пространствени размери и геометрията на окарстените зони. Същевременно, отсъствието на сондажни данни, на практика демонстрира приложимостта и ефективността на електротомографския метод за предварителни оценки за наличие на окарстени и по-водообилни зони и перспективни участъци за изграждане на вододобивни сондажи.

Литература

Димовски, С. *Електротомографски изследвания на геоложката среда*. Дисерт., С., МГУ "Св. Иван Рилски", 2010. - 387 с.

Димовски, С., Н. Стоянов, Ч. Гюров. Ефективност на електротомографията за детайлно геоелектрично картиране на приповърхностния геоложки разрез. – *BULAQUA (БУЛАКВА)*, 4, 2007. - 47-55.

Димовски, С., Н. Стоянов. Приложение на геоелектрични проучвания при изучаване на хидрогеоложките условия в карстови райони. – *6-та Национална конференция по геофизика "20 години Дружество на геофизиците в България"*, София, 2010. - 4 с.

Димовски, С., Н. Стоянов. Геоелектричен подход при изучаване на *хидрогеоложките* условия в района на ДБО Асеновград. – *Год. МГУ "Св. Ив. Рилски", т. 54, св. I, Геол. геоф.*, 2011. - 125-130.

Димовски, Ст., Н. Стоянов, Хр. Цанков, Ат. Кисьов. Електротомографски изследвания в района на Зографския манастир в Света гора, Атон. – *Год. МГУ "Св. Ив. Рилски", т. 55, св. I, Геол. геоф.*, 2012. - 96-101.

Кожухаров, Д., Р. Димитрова, Н. Кацков. *Обяснителна записка към геоложка карта на България М 1:100000 - картен лист Пазарджик*. С., КГМР, 1992. - 54 с.

Стоянов, Н. *Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци*. Дисерт., С., МГУ "Св. Иван Рилски", 2003. - 215 с.

Стоянов, Н. Метод за дефиниране на локални геоелектрични критерии за оценка на замърсяването на подземните води. – *BULAQUA (БУЛАКВА)*, 2004. - 4.

Стоянов, Н., Ч. Гюров. Оценка на замърсяването на подземните води по метода на 2D електро-съпротивително проучване по схемата полюс-дипол – *Год. МГУ "Св. Ив.Рилски", т. 47, св. I, Геол. геоф.*, 2004. - 219-224.

Стоянов, Н., Ст. Стойнев, Ч. Гюров. Детайлизиране на инженерно-геоложките и хидрогеоложките условия посредством геоелектрични модели – *Сп. "Геол. и минер. рес.", бр. 10*, 2004. - 8-12.

Daniels F., R. A. Alberty. *Physical chemistry*. John Wiley and Sons, Inc. 1966. - 674 p.

Dimovski, S., N. Stoyanov, S. Kostyanev. Application of electrical resistivity techniques for investigation of landslides. – *Proceedings of the First International Conference on Remote Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region, EARSeL, Zadar, Croatia,* 2008. - 241-251.

Griffiths, D. H., R. D. Barker. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. – *Journal of Applied Geophysics*, 29, 1993. - 211-226.

Keller G.V., F.C. Frischknecht. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford. 1966. - 517 p.

Loke, M. H. *A practical guide to RES2DINV ver. 3.4; Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2-D & 3D.* Geotomo Software. Penang, Malaysia. 2001. - 151 p.

Loke, M. H., R. D. Barker. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. – *Geophysical Prospecting*, 44, 1996. - 131-152.

Статията е рецензирана от проф. д-р Ради Радичев и е препоръчана за публикуване от кат. "Приложна геофизика".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ПОВИШАВАНЕ РАЗРЕШАВАЩАТА СПОСОБНОСТ НА СЕИЗМОГРАМИТЕ ЗА ИЗВЪРШВАНЕ НА СКОРОСТЕН АНАЛИЗ ПРИ ОБРАБОТКАТА НА СУХОЗЕМНИ СЕИЗМИЧНИ ДАННИ

Мая Григорова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", maya.grigorova86@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Кинематичните поправки в сеизмопроучването, подбрани на базата на реалните отражения, в общия случай гарантират добро сумиране на данните и реална представа за характера на отражателните повърхнини. При наличие на шумове в регистрираните данни много често е почти невъзможно извършването на коректен и детайлен скоростен анализ за определяне на точните кинематични поправки, които следва да се внесат в данните. Поради тази причина често се търсят решения, с които да се повиши разрешаващата способност на сортираните за извършване на скоростен анализ сеизмограми посредством разнородни филтриращи процедури, с помощта на които максимално да се отстрани влиянието на пречещите вълни, а в сеизмограмите да останат предимно реалните отразени вълни.

Ключови думи: скоростен модел, филтрация, резолюция

HIGH RESOLUTION VELOCITY ANALYSIS IN SEISMIC DATA PROCESSING

Maya Grigorova
University of Mining and geology "St. Ivan Rilski", maya.grigorova86@gmail.com

ABSTRACT. In reflection seismology seismic data are usually contaminated with noise, which refers to any unwanted features in the data. One of the most important criteria for data quality is visibility of primary reflections, often quantified as signal-to-noise ratio. For achieving this goal one possible solution is to perform high resolution velocity analysis. Building adequate, high resolution velocity analysis is basic step for creating realistic and reliable geological section. Creating correct velocity model requires good differentiation between primary reflections and seismic noise. For achieving better velocity model resolution it is sometimes suitable to perform linear noise attenuation procedures before to perform velocity analysis.

Keywords: velocity model, filtration, resolution

Въведение

През последното десетилетие постигането на висока резолюция в обработката на сеизмични данни е придобило първостепенно значение при съставянето на сеизмичните разрези. Това е особено актуален въпрос при реобработката на стари сеизмични данни, при които се наблюдават конкретни специфики на записа като малък брой канали, ниска кратност на данните, ограничен офсет и други. От друга страна, в съвременни условия използването на повърхностни източници на енергия (Вибросейз) понякога води до повишаване нивото на шум в записаните данни. Това налага необходимостта от прилагане на повече на брой и по-агресивни филтриращи процедури върху данните. Често пъти, обаче, прилагането на подобни процедури върху сеизмограмите води не само до премахване на пречещите вълни, но и до загуба на полезен сигнал. Същевременно при наличие на остатъчни шумове в данните се затруднява изпълнението на последващите обработващи процедури, една от които е извършването на детайлен скоростен анализ на данните за определяне на кинематични поправки. Скоростният анализ в сеизмичната обработка има ключова роля за съставянето на адекватни и високо разрешаващи сеизмични изображения. Поради тези причини усилено се търсят нови техники и методики, с помощта на които да се осигури максимална разделителна способност на изследваните данни за целите на уверена и достоверна структурна интерпретация.

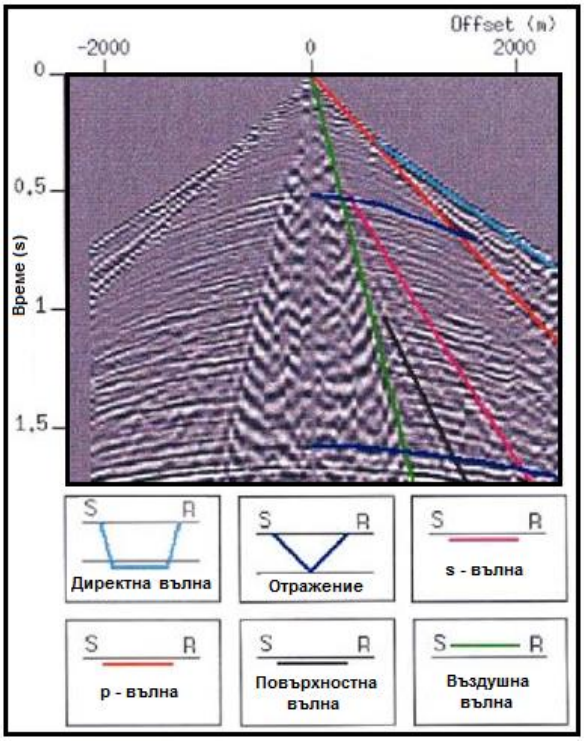
Предпоставки за наличие на шум с различен характер в сеизмограмите

Шумът в сеизмичните данни е неизменна част от записаните сеизмограми. Всяка сеизмограма съдържа, както полезен сигнал, така и определено количество шум. В общия случай, за да бъде постигната задоволителна разрешаваща способност в крайния продукт от обработката на данните е необходимо съотношението полезен сигнал / шум да е достатъчно голямо.

Наличието на шум в записите може да се дължи на много и разнообразни фактори като вида на източника на възбуждане, избраната система на запис, броя на работещите канали, кратността на данните, минималното и

максималното отдалечение от източника (офсет), полевите условия, климатичните условия, наличието на смутители на сигнала, антропогенни фактори и други. Като цяло тези фактори се обобщават като параметри на проучването. Параметрите на проучване се определят специфично за всеки регион на проучване, така че да бъде постигнато най-доброто отношение сигнал-шум на сеизмичните записи, както и да бъде регистриран възможно най-широкият честотен спектър на целевите хоризонти. Първите важни параметри са източникът на енергия и видът на сеизмоприемниците. Избира се най-подходящият за региона на проучване източник, с който да се осигури оптимално регистриране от сеизмоприемниците. Следващият параметър е интервалът на регистриране, както по време (стъпката на квантуване), така и в пространството (разстоянието между групите сеизмоприемници). Определят се също така минималното и максималното отдалечение на сеизмоприемниците от източника, които трябва да бъдат съобразени с целите на проучването.

Често различните по вид смутители на сигнала предизвикват различни по вид шумове в данните (фиг. 1).



Фиг. 1. Сеизмограма, на която могат да се наблюдават различни видове шум

Един от най-важните аспекти от обработката на сеизмичните данни включва разкриването на полезния сигнал чрез потискане на различните видове шум.

Търсените отражения върху записите се разпознават по хиперболичния си вид, дължащ се на разликата във времената им на пристигане с отдалечаване от източника. Най-често на сеизмограмите се регистрират освен отразените вълни, също така директната вълна, повърхностни вълни, пречупени вълни, въздушни вълни и други.

При разпространение в нехомогенна среда, скоростта на разпространение на повърхностните вълни рядко надвишава скоростта на s-вълните като достига до 1500 m/s. Тя често зависи от честотата на вълните и е възможно рязко да се изменя, различавайки се силно от тази на полезния сигнал, което се явява и основен начин за тяхното диференциране (Telford et al., 1990). За успешна филтрация на повърхностни и s-вълни е необходимо да се уточни детайлно тяхната скорост на разпространение в земята и по възможност честота им. Методът за филтрацията им си служи с информация за скростите и честотния диапазон на пречещите вълни, като трансформира данните от време-пространствената област в честота-пространствената област, където процедурата работи по смесени трасета. Броят на трасетата, които се смесват на всяка честота до граничната се определя от израза:

$$mix = \frac{V}{\text{честота} * \text{разстояние между трасетата}}$$

където: V е скоростта на пречещите вълни.

Директната вълна се състои от хоризонтално придвижващата се част на полусферата от P вълни. Трябва да се отбележи, че директната вълна се придвижва в права линия от приемник на приемник и на сеизмичния запис е представена от постоянен наклон. Директните вълни затихват много бързо или се губят в пречупените вълни и по тази причина не могат да бъдат идентифицирани след първите няколко трасета. Основен подход към потушаването им се явява изрязването им от записите под формата на мют анализ (Leskinen, 1975).

Въздушните вълни се разпространяват в земята със скорост близка до тази на звука във въздуха (приблизително 330 m/s), откъдето идва и името им. Тяхната скорост не зависи от честотата им на разпространение, а от външни фактори като температура на въздуха и посока на вятъра. Вълновия им спектър варира в широки граници, което затруднява отстраняването им от данните. Основният метод за потушаването им се базира на отличителната им скорост на разпространение в земята (Landmark, Promax reference manual, 1995).

Вълните разпространяващи се в един пласт (Guided waves) се пораждат при редуване на пластове с ниска и с висока скорост на разпространение на еластичните вълни. Тези вълни в голяма част от случаите интерферират с реалните отражения и по тази причина са трудни за отстраняване от данните. Този тип вълни са широко разпространени, главно в записите от морски сеизмични изследвания и са породени от силния контраст в скоростите на разпространение на вълните във водните пластове и под морското дъно. По този начин, по-голямата част от енергията се разпространява хоризонтално през водните пластове. Характерно за тях е, че колкото е по-голям контрастът в скоростите на разпространение на вълните във водата и под дъното, толкова повече вълни от този тип се генерират. Вълни, които се разпространяват в един пласт се наблюдават и в сеизмични изследвания на сушата, като основният подход за потискането им се явява сумирано по обща дълбочинна точка. Основните проблеми, които този тип вълни, а също и останалите

регистрирани шумове с праволинейни ходографи, създават се проявяват главно в сеизмограмите сортирани за извършване на скоростен анализ. Определянето на вярна кинематична поправка може да се окаже не лека задача, в случай че ходографите на отразените вълни са „скрити“ под тези на регистрирания шум. В тези случаи е възможно определените кинематични поправки да са неточно подбрани, което от своя страна да доведе до неверни и объркващи резултати при сумиране на данните с тях.

Методи за повишаване резолюцията на сеизмограмите при извършване на скоростен анализ на сеизмични данни посредством различни филтриращи процедури

Потискането на шумове с праволинейни ходографи се налага поради факта, че в голяма част от случаите този тип вълни се характеризират с висока енергия и много често „закриват” реалните отражения. За извършването на детайлен скоростен анализ с висока резолюция е необходимо сортираните сеизмограми за анализа да съдържат предимно ходографи на отразените вълни и колкото е възможно по-малко такива на пречещите вълни (Jones, 2010).

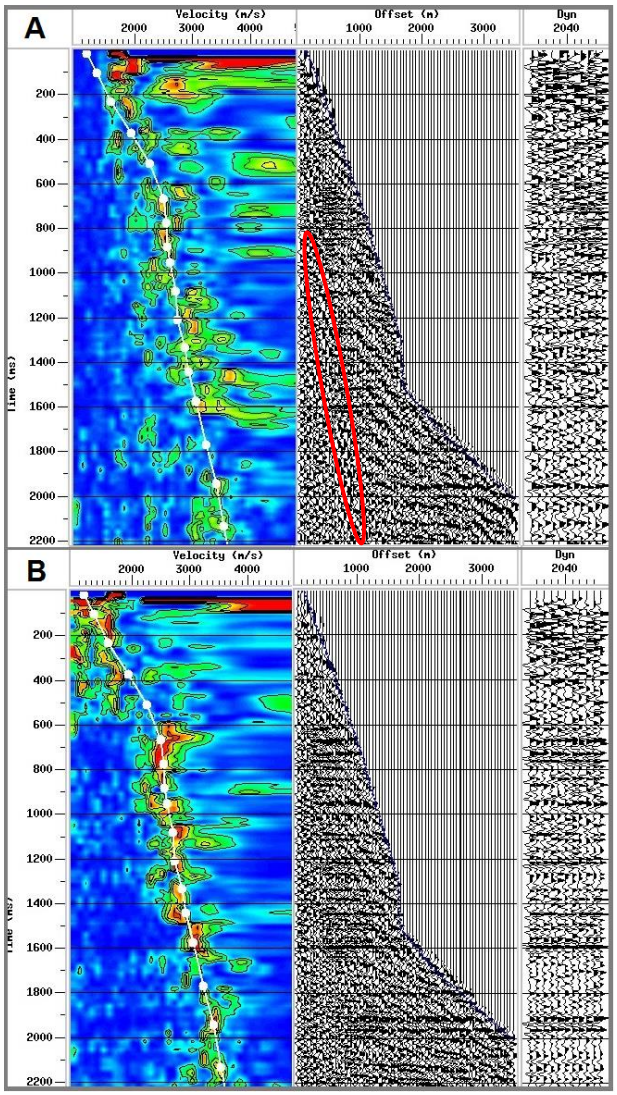
В обработката на сеизмични данни са познати множество процедури, насочени към потушаване на шумове с праволинейни ходографи, които се прилагат преди сумиране на данните. Тъй като и самата процедура по сумиране на сеизмограмите по метода на общата дълбочинна точка също спомага за елиминиране влиянието на пречещите вълни, става много трудно да се оцени качеството на сеизмограмите за извършване на скоростен анализ за определяне на точни кинематични поправки, в случай че след сортиране в сеизмограмите за анализ има остатъчни влияния на пречещи вълни. Поради тази причина е възможно да се приложи допълнително филтриране на сортираните за скоростен анализ сеизмограми, като в последствие то не се прилага при сумиране на сеизмограмите, а служи само за целите на по-уверен скоростен анализ.

При анализа на различни видове шум с праволинейни ходографи, които най-често се наблюдават върху сортираните за извършване на скоростен анализ сеизмограми, са разгледани конкретни филтриращи процедури, които в най-голяма степен постигат търсеният ефект – максимално съотношение сигнал/шум за целите на достоверен скоростен анализ (Григорова, 2013). Една част от филтриращите процедури са приложени върху данните още на етапа на предварителната подготовка. При условие, че в данните се наблюдават остатъчни ефекти или такива, които не са се повлияли от избрания набор филтрационни процеси се налага допълнително филтриране с цел подобряване на изображението и по-отчетливо проследяване на ходографите на отразените вълни.

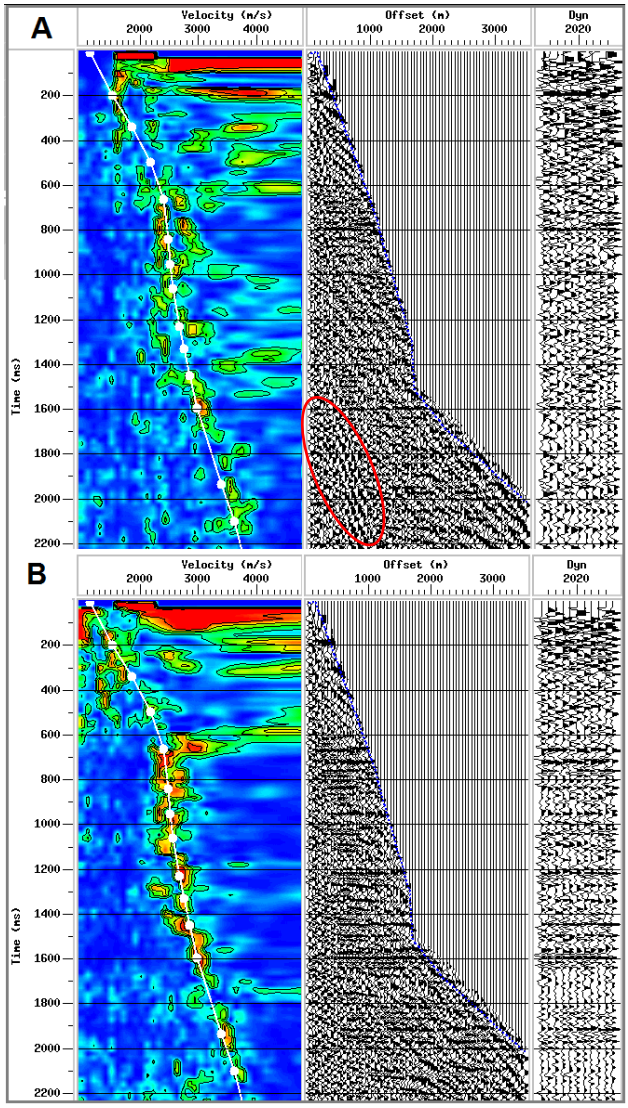
На фигура 2 е показана сеизмограма, на която се наблюдават пречещи вълни с линейни ходографи, от типа въздушни вълни, разпространяващи се в земята със скорост 342 m/s. За потискане на въздушните вълни е приложена процедурата Air Blast, чиято цел е да премахне всички вълни, придвижващи се в земята с посочената скорост на разпространение. Необходимостта от посочената процедура се налага поради факта, че така проектирана, върху сортираните сеизмограми за извършване на скоростен анализ, въздушната вълна не позволява да се направи правилна преценка за необходимата кинематична поправка. Това би довело до неуверени резултати при сумиране на данните с така съставените кинематични поправки.

Тъй като скоростта на въздушните вълни е отличително ниска, в сравнение с тази на полезният сигнал, вероятността да се премахнат и част от реалните отражения е незначително ниска, а качеството на сеизмограмата след прилагане на филтъра значително се е подобрило.

На сеизмограмата на фигура 3 се наблюдават пречещи вълни с линейни ходографи от типа повърхностни и граунд-рол вълни. За потискане на тези смущения е приложена процедурата Surface Wave Noise Attenuation, чиято цел е да премахне вълните от този тип въз основа на отличителните разлики в скоростта им на разпространение в земята и разликите в честотния им състав спрямо полезния сигнал.



Фиг. 2. Скоростен анализ: А - сортирана сеизмограма с наличие на въздушна вълна; В – филтрирана сортирана сеизмограма



Фиг. 3. Скоростен анализ: А - сортирана сеизмограма с наличие на повърхностни вълни; В – филтрирана сеизмограма

След прилагане на процедурата се наблюдават много по-отчетливо ходографите на отразените вълни.

На сеизмограмата на фигура 4 ясно се виждат пречещи вълни с линейни ходографи, които буквално "закриват" енергията на реалните отразени вълни под тях. За потискане на тези линейни вълни, данните са трансформирани в F-K областта, където ръчно е определен полигон за прилагането на F-K филтър.

Честотните граници на полигона варират в диапазона от 0 до около 70 Hz. След нулиране на данните в областта извън полигона, резултатът показва силно потискане на пречещите вълни с линейни ходографи и по-ясно изобразяване на реалните отражения.

За илюстриране на скоростен анализ след извършване на допълнителните процедури по филтрация на сортираните сеизмограми е избрана една скоростна функция (фиг. 5).

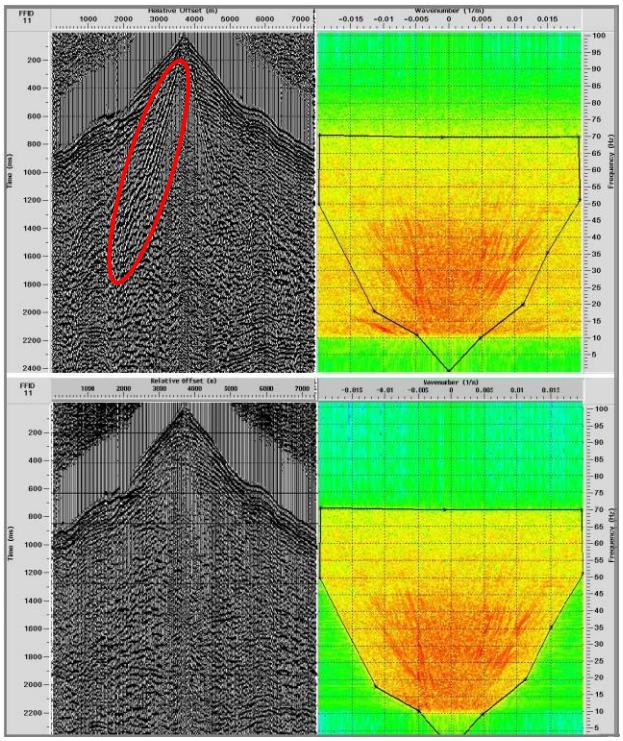
Скоростната функция има следните характеристики:
- Брой на трасетата формиращи една функция – 15;
- Разстояние между скоростните функции – 500 m.

Контурната карта на скоростния панел дава възможност да се определят приликите в скоростта между съседни трасета, като най-големите сходства в скоростите между трасетата се отбелязват като максимуми на подобието. Както се вижда на избрания скоростен анализ, функцията минава през максимумите на подобието, като така осигурява сходство в избраната скорост между отделните функции

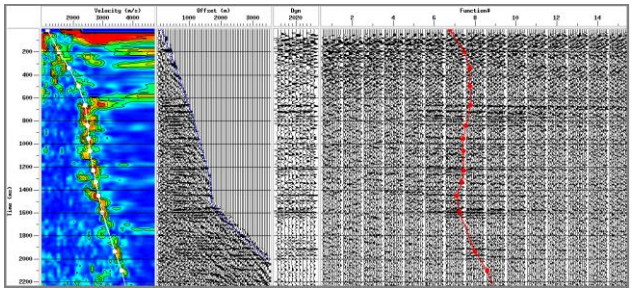
Както се вижда от динамичния панел, сумирането на данните с непосредствено пикираните скорости позволява отчетливо да се открият основните отражателни граници.

По такъв начин, след прилагане на кинематична поправка с така избраните скоростни функции в сумираните данни отчетливо се наблюдават реални отражателни граници.

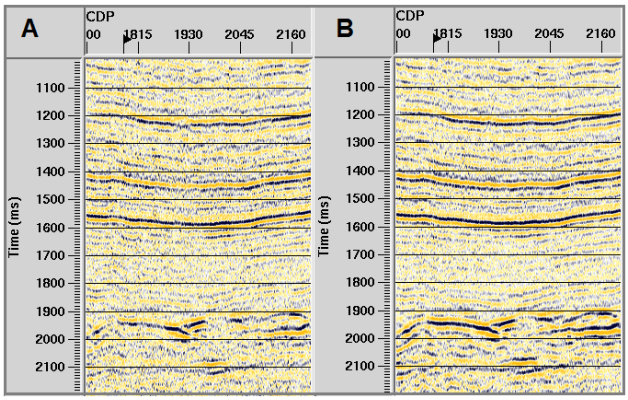
На фигура 6 е показано сравнение между данни, сумирани с кинематични поправки, получени преди и след допълнително филтриране на сортираните за скоростен анализ сеизмограми. От анализа на получените изображения ясно може да се проследи характерът на отражателните повърхнини, както в по-плитката част на разреза, така и в по-дълбоките му части. Много по-уверено проследяване на отражателните граници се наблюдава върху разреза, получен със скоростен модел подбран върху филтрирани сеизмограми.



Фиг. 4. F-K филтър за потискане на линейните пречещи вълни



Фиг. 5. Скоростен анализ върху филтрирана сортирана сеизмограма



Фиг. 6. Сумирани данни: А – с кинематична поправка, получена при извършване на скоростен анализ с нефилтрирани сеизмограми; В - с кинематична поправка, получена при извършване на скоростен анализ с филтрирани сеизмограми

Заключение

Сеизмичните данни, най-общо, се състоят от наслагването на реалните отражения с други най-разнообразни пречещи вълни. Основна задача на обработващите процедури е да отслабят действието на смущаващите фактори, за да се подобри съотношението сигнал/шум.

От точността, с която се определя пространственото изменение на скоростта в средата и до основните отразяващи граници, до голяма степен зависи и точността на построяване на сеизмичните разрези (Григорова, 2015).

При съставянето на скоростен модел на средата могат да се направят следните изводи:

- Съставянето на адекватен, високо разрешаващ скоростен модел на средата се явява основна стъпка към изграждането на реалистичен геоложки разрез;
- Построяването на коректен скоростен модел на средата изисква разпознаване и диференциране на полезния сигнал от пречещите вълни;
- Ключов момент при подбора на надежден скоростен модел на средата е проследяването за структурната логичност на разреза.

По такъв начин анализът на кинематичната поправка на сеизмичните вълни има ключова роля в процеса на високо разрешаващата обработка на сеизмични данни. Поради това се търсят възможности за съставяне на адекватен и максимално надежден скоростен модел на средата, който да осигури по-уверена и надеждна интерпретация на данните.

Литература

Григорова, М. Роля на кинематичните поправки в обработката на сухоземни сеизмични данни за повишаване на съотношението сигнал/шум. - *Proceedings of XV Balkan Mineral Processing Congress, Vol. 2, Sozopol, Bulgaria,* 2013. - 1260-1262.

Григорова, М. Кинематична характеристика на сеизмичните вълни. - *"Дни на физиката 2015", Технически универ.-ситет*, 2015. - 60-67.

Jones, I. F. An introduction to: velocity model building. - *EAGE Publication bv.,* 2010. - 59-66

Landmark, ProMAX Reference Manual, Advanced Geophysical Corporation, 1995.

Leskinen, D. Introduction to command seismic processing. Petty-Ray Geophysical, Inc., 1975. - 43-54.

Telford, W. M., L. P. Geldart, R. E. Sheriff. Applied Geophysics. – *Second edition, Society of Exploration Geophysicists*, 1990. - 149-151.

Статията е рецензирана от проф. дгн Стефан Димовски и е препоръчана за публикуване от кат. "Приложна геофизика".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ПАСИВНА СЕИЗМИКА ЗА ЦЕЛИТЕ НА ТЪРСЕНЕ И ПРОУЧВАНЕ НА ВЪГЛЕВОДОРОДИ

Мая Григорова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, maya.grigorova86@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Пасивната сеизмика се отличава като неинвазивен подход, посредством който е възможно добиването на голямо количество сеизмични данни чрез наблюдения от сеизмични станции, разположени в даден регион. На съвременен етап все по-голяма популярност добива използването на данни от пасивна сеизмика за търсещо-проучвателни работи за нефт и газ, както и за мониторинг на находища в експлоатация. Методът се отличава като неинвазивен, ефективен и достатъчно надежден за проследяване на вълновата картина на големи площи, които в случай на конвенционално сеизмично проучване биха били по-скоро икономически нерентабилни за обстойно изследване.

Ключови думи: пасивна сеизмика, нискочестотен сигнал, нефт и газ

PASSIVE SEISMIC IN HYDROCARBON EXPLORATION

Maya Grigorova
University of Mining and geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, maya.grigorova86@gmail.com

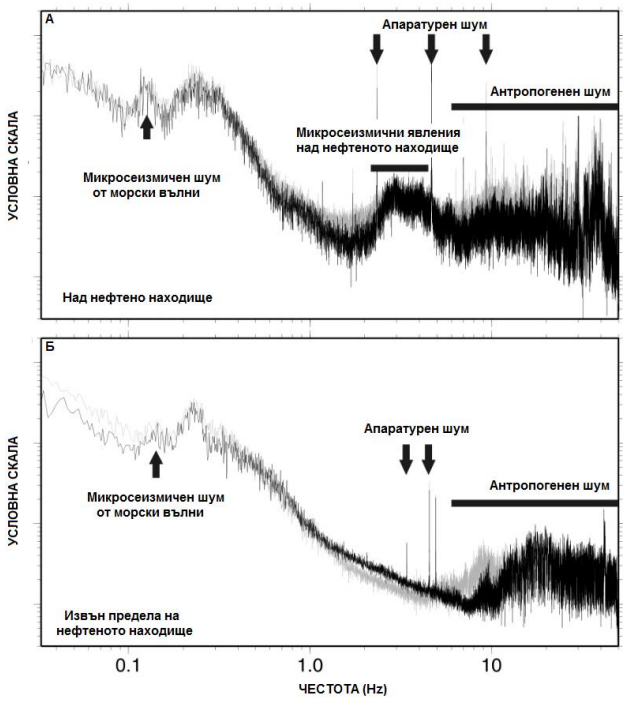
ABSTRACT. Passive seismic is the detection of natural low frequency earth movements, usually to recognize geological structure and locate underground oil, gas, or other resources. Most of all passive seismic method is used in hydrocarbon exploration to support exploration efforts and minimize risk. In recent years, the technique has been applied to many oil and gas fields throughout the world and proof itself as a potentially powerful tool in the exploration of hydrocarbon resources. Passive seismic proof itself as a cost effective way to image a large area, where the terrain is difficult and consequently, conventional seismic is expensive and can be of poor quality due to seismic penetration problems.

Keywords: passive seismic, low frequency signal, oil and gas

Въведение

Сеизмичните изследвания, провеждани за целите на търсещо-проучвателните работи за нефт и газ, са свързани с провеждането на планирани полеви сеизмични дейности. Извършването на самото сеизмично проучване е сложен и скъпоструващ процес, изискващ внимателен подбор на параметрите на проучването – дълбочина на проучването, честотен състав на данните и др. Придобитите сеизмични данни впоследствие се обработват и използват за създаване на сеизмични разрези, служещи за съставянето на геоложки хипотези за характера на подповърхностната среда. Като един от най-съществените компоненти на изследването, оказващ директен ефект върху качеството на получените разрези, се отличава честотният диапазон на сеизмичните данни. Традиционно се смята, че данните трябва да съдържат достатъчно широк честотен диапазон, за да бъдат получените разрези с висока резолюция. През последните години все по-сериозно внимание започва да се отделя на нискочестотната компонента на сигнала и приноса й като полезен компонент, носещ информация за вълновата картина, най-вече в приповърхностната част на разреза. Подобни техники отдавна се използват за решаване на различни инженерно-геоложки задачи, но в последно време ниските честоти придобиват популярност и в нефтената индустрия като допълнителни и надеждни източници на полезна информация. Все повече изследвания са насочени към изучаване въздействието на нискочестотния сигнал върху въглеводородни залежи и характера на тези регистрирани въздействия. Като бързоразвиващо се и неинвазивно направление в тази посока се откроява пасивната сеизмика. Тя се фокусира върху ниските честоти в порядъка от 1 до 6 Hz. Нискочестотният случаен шум в природата има разнороден характер. Счита се, че наличието на честоти под 1 Hz се дължат главно на движението на водни маси и метеорологичните условия (Longuet-Higgins, 1950; Peterson, 1993; Webb, 2007). За произхода на честотите малко над 1Hz се смята, че са предизвикани от човешката дейност и се характеризират с дневна и седмична цикличност в проявлението си (Yamanaka et al.,1993; Bonnefoy-Claudet et al., 2006).

Използването на пасивната сеизмика за целите на търсенето и проучването на нефт и газ се основава на анализ на сходни характеристики на сигнала, наблюдавани над доказани находища на въглеводороди. Тези характеристики се свързват с ясно изразени пикове на сеизмограмите в порядъка на 1,5-4 Hz (Dangel et al., 2003).



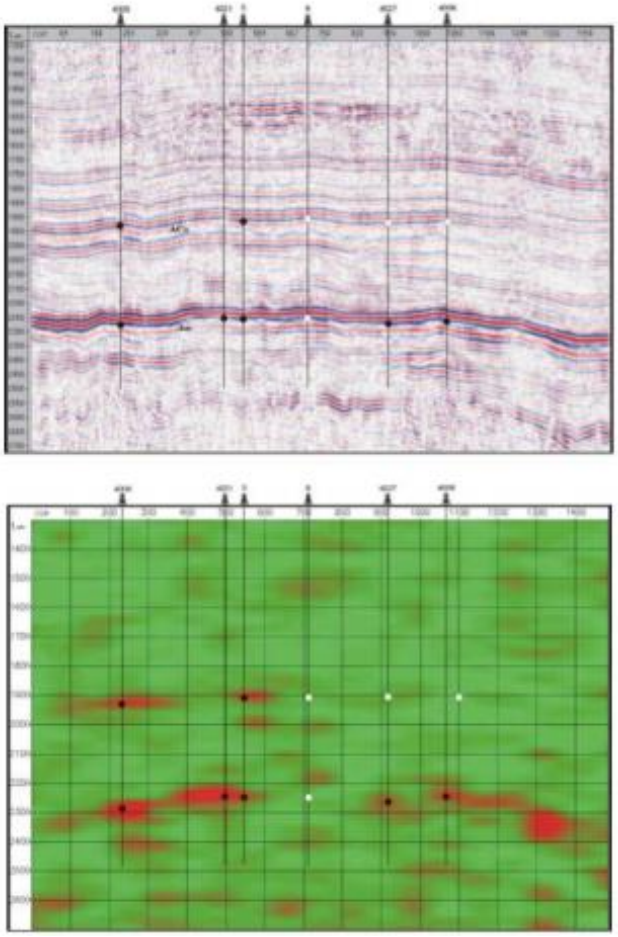
Фиг. 1. Условна графика, демонстрираща вида и характера на микросеизмичните явления, свързани с търсеното и проучването на нефт и газ: А - Микросеизмични явления над доказано нефтено находище; Б - Микросеизмични явления извън пределите на нефтеното находище

Пасивната сеизмика започва да се прилага широко в нефтената индустрия през последните години като съпътстващ метод с цел минимизиране на риска. Методиката изисква извършване на допълнителни тестове и експерименти, но със сигурност се отличава като перспективен и мощен инструмент в търсенето и проучването на въглеводороди по света (Sitinjak et al., 2014).

Същност и развитие на пасивната сеизмика

Микросеизмичните явления са предизвикани от непрестанните движения на Земята и се определят като фонов шум при извършване на специализирани изследвания. Въпреки че тези движения са изключително слаби и не се отчитат от човешките възприятия, те се регистрират от специална апаратура и могат да се използват като източник на полезна информация за характера на земните размествания и за анализ на подповърхностната среда, в която се разпространяват акустичните вълни породени от тях. На практика на това се основава методът на пасивната сеизмика, който започва да се прилага все по-широко в инженерната и търсещо-проучвателната практика. Методът се отличава като изключително подходящ за урбанизирани райони, където проучвателните работи са силно затруднени от наличието на разнородни смутители. Приложението на метода в процеса на търсене и проучване на въглеводороди се свързва, както с намаляване на риска при проучването, така и с ползата от прилагането на неинвазивен подход при събиране на данни за изследвания терен.

На фигура 2 е показан сеизмичен разрез от действащо находище на въглеводороди, на който се отличават два продуктивни хоризонта. За същата площ са обработени и анализирани и нискочестотни данни, получени в резултат от естествени движения на земните пластове и регистрирани от специална апаратура в района на изследването. Направените хидродинамични изследвания за приток на флуиди в проучвателните сондажи в изследваната площ, ясно показват наличие на въглеводородни флуиди в два хоризонта, които почти идеално корелират с обработената информация, получена чрез методиката на пасивната сеизмика (Goloshubin et al., 2002).



Фиг. 2. Горе: Сеизмичен разрез от действащо находище на въглеводороди, на който се отличават два продуктивни хоризонта; Долу: Обработени нискочестотни данни от пасивна сеизмика над същото находище. Сондажи: ● – нефт, ○ – сух сондаж (Goloshubin et al., 2002)

Техниката на изследването с прилагане на пасивна сеизмика не изисква използването на изкуствен източник на сеизмични вълни (динамит, Вибросеиз), тъй като наблюдаваните микросеизмични явления са породени от естествените движения на Земята.

За природата на микросеизмичните явления продължават да се водят дискусии. През последните години се наложи схващането, че са породени от наличието на повърхностни вълни (в частност вълните на Релей) или резонанс на s – вълните. Независимо от това, единодушно е възприето схващането, че микросеизмичните явления са резултат, както от дневната активност на хората, така и от природни фактори, за които продължава да се търси

обяснение. Антропогенната активност като автомобилния трафик, използването на тежка техника и съоръжения може да предизвика подобни сеизмични явления от порядъка на 1 Hz и повече. Към природните фактори, които оказват влияние се включват океанските вълни, атмосферното налягане, вятърът и др. Те се отличават най-често с честоти под 1 Hz (Okada, 2003).

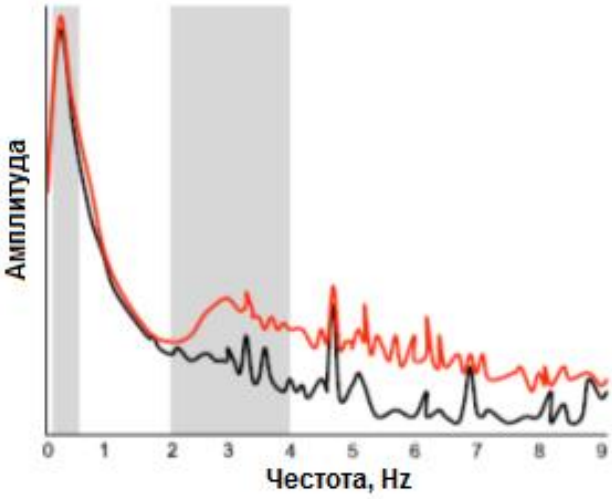
Идеята за използване на пасивна сеизмика за целите на нефтопроучването се е зародила в началото на 1990 година, когато екип от руски учени установили при наблюдения в Сибир и Северен Кавказ, че нискочестотният сигнал над въглеводородни залежи е с порядък от 1-10 Hz по-висок от този извън границите на залежите. Тези техни открития стават основа за развитието на едно изцяло ново направление в търсещо-проучвателните работи за нефт и газ. През 2003 година пасивната (нискочестотна) сеизмика отново приковава вниманието на специалистите след изследване на Dangel и екипа му (Dangel et al., 2003). Те откриват струпване на високоамплитудни компоненти на сеизмичните вълни при честоти около 3 Hz, измерени над въглеводородни залежи в Средния изток. Основното откритие тук било това, че фоновият шум като че ли се е модифицирал в нискочестотен точно над структурите, наситени с въглеводороди в сравнение с този, регистриран над водонаситени структури. Подобно изследване е проведено и в Бургос (Мексико), където резултатите също показали високи нива на корелация между нискочестотни аномалии и известни вече газови находища (Saenger, 2007).

В морски условия също са наблюдавани подобни резултати в Северно море (Норвегия). Изследването се осъществило посредством сеизмоприемници, разположени на дъното на морето на около 350 m дълбочина. Резултатите показали около 130 места с нискочестотни аномалии, за които се предполага, че са породени от наличие на въглеводородни залежи.

Година по-късно било проведено изследване в нефтено поле в Североизточна Бразилия, където според Graf (Graf et al., 2007) тестовете показали ясно двете зони и частично откроили третата, в които се наблюдават залежите в блока. На фигура 3 (Graf et al., 2007) са показани амплитудите на сигнала в зависимост от честотния спектър в (червената крива) и извън (черната крива) границите на залежа. Смята се, че ниско честотните аномални зони в порядъка на 2-4 Hz се дължат на наличието на въглеводороди. Амплитудният пик в началото на около 0,2 Hz вероятно се дължи на океанските вълни.

Счита се, че вероятните причини за тази аномалия са две. Първата се дължи на резонансно усилване в порите на резервоарната скала, където сеизмичната енергия попада в многофазова флуидна система, в следствие, на което пренесената към детекторите сеизмична енергия се отличава със специфичен честотен диапазон.

Втората причина е възможно да се дължи на голямата разлика в коефициентите на отражение на резервоарните комплекси и вместващата среда, която по този начин предизвиква появата на подобен нискочестотен диапазон в регистрираните сеизмични сигнали.



Фиг. 3. Графика на зависимостта на амплитудите на сигнала от честотата му (по Graf et al., 2007 с изменения

Според друга хипотеза (Chutov et al., 2002), тъй като въглеводородните залежи представляват мулти-компонентна система, при разпространение на акустични вълни през такава система те се модифицират в зависимост от състава й. По такъв начин могат да се правят изводи не само за наличието на въглеводороди, но и като цяло за литологията на резервоара. Според същите автори е възможно дори да се идентифицира видът на евентуалните флуиди в резервоарните скали, тъй като според тях амплитудните аномалии в диапазона от 2 до 3,5 Hz са свързани с въглеводороди, а тези между 4 и 6,5 Hz с наличието на вода. Възможни са и частични изменения в диапазона на тези стойности в зависимост от морфологията на резервоара, хидростатичното налягане в порестите скали, което от своя страна зависи пряко от порестостта, пропускливостта и температурата на колекторите, поровото налягане, както и от вискозитета на флуидите. Авторите на това изследване също така смятат, че амплитудният пик над скали колектори, наситени с газ, е по-голям от този при наличие на нефт в колектора.

Приложение на методиката в световен мащаб

В нефтената индустрия естествената сеизмичност започва все по-широко да се използва за мониторинг и картиране на разломи, миграцията на флуидите в скалите, а също и при фракинг операциите (Maxwell, Urbancic, 1998). В някои случаи информацията добита от микросеизмичните явления се използва успешно като допълнителен източник на сведения за района на изследването, които допълват цялостната геолого-геофизична представа за терена (Ali et al., 2009). Тази информация е от съществено значение за намаляване риска при евентуални по-нататъшни сондажни дейности (Holzner et al., 2005). През 2009 Zhang (Zhang et al., 2009) използва предизвиканата от добивните дейности сеизмичност за съставянето на 3D Vp и Vp/Vs томография. През последните години именно това направление на пасивната сеизмика придобива сериозна популярност при извършване на регионални изследвания за търсещо-проучвателни дейности, тъй като се отличава като неинвазивно и сравнително рентабилно, в сравнение с конвенционално 3D проучване (Martakis et al., 2006).

В допълнение на това, микросеизмични явления са използвани за изясняване на подповърхностната среда в множество седиментни басейни. При изследване, проведено над пустинни райони в Саудитска Арабия и Северна Африка, придобитите по МОВ сеизмични данни били съпоставени с информация от микросеизмични явления, регистрирани над същите райони. Съвместното тълкуване на информацията показало много добра корелация между микросеизмичните явления и добитите полеви сеизмични данни от провежданите проучвания (Draganov et al., 2007, 2009).

Друго приложение на методите на пасивната сеизмика, добиващо голяма популярност, се свързва с мониторинг при проучване и добив на шистов газ, тъй като методиката не изисква допълнителни усилия за създаване на сеизмичния сигнал, а използва фракинг технологията като източник на акустична енергия. По такъв начин се получава информация в самия момент на фракинга и се извършва ефективен мониторинг на процеса.

Същевременно технологията може да се разглежда и като система за ранно предупреждаване за евентуални рискове за околната среда и човешкото здраве.

В насоките за бъдещо развитие на метода се очаква да стане възможно наблюдението на по-дълбоки зони от потенциалния резервоар, като се „улавят“ още по-слаби микросеизмични процеси и дори да се отчита разликата във физичните свойства на колектора при движението на флуидите.

Предпоставки и насоки за развитие на методиката

За развитието на пасивната сеизмика допринася и фактът, че необходимостта от въглеводородни суровини продължава да нараства, а тъй наречените „лесни за откриване и експлоатация“ находища вече не съществуват. Предизвикателствата пред търсещо-проучвателните компании нарастват, както по отношение на инженерно-геоложките фактори, така и във връзка с обществената чувствителност и недоверие към екологосъобразните концепции за търсене и експлоатация на откритите находища, които те прокламират. Към въглеводородните запаси на бъдещето в акваторията се открояват – дълбоководието, сложно залягащите капани около солни куполи в Мексиканския залив, Бразилия и Западна Африка, както и арктическият регион.

На сушата вниманието на специалистите е насочено основно към неконвенционалните източници на въглеводороди – главно шистов газ. Обобщен поглед към предполагаемите запаси на сушата и в акваторията показва, че те имат нещо общо – всички изискват прилагането на комплексен и иновативен подход, а това несъмнено подчертава необходимостта от разширяване кръга от проучвателни подходи, които да бъдат прилагани за тази цел (Mueller, 2012).

Заключение

Пасивната сеизмика се отличава като неинвазивен подход, посредством който става възможно наблюдението и анализа на допълнителна сеизмична информация за обекти и структури представляващи интерес, както в инженерно-геоложко отношение, така и за целите на търсещо-проучвателните работи за нефт и газ.

Методът на пасивната сеизмика се отличава като новаторски, гъвкав и екологосъобразен. Неговото голямо преимущество се състои във възможността, която технологията дава за намаляване на проучвателните и експлоатационни рискове при търсенето и проучването на въглеводороди. Едни от най-отличителните му предимства в тези процеси са:

- Осигурява задоволителна първоначална информация, която предхожда класическите при търсене и проучване на въглеводороди сеизмопроучвателните работи по метода МОВ;
- Възможност за прецизиране позицията на проектните проучвателни и впоследствие експлоатационни сондажи;
- При определени условия дава възможност за идентифициране на водо-нефтения контакт;
- Методът успешно се прилага за мониторинг на всички етапи от търсещо-проучвателните работи и в последствие при процеса на експлоатация.

Литература

Ali, M., K. A., Berteussen, J., Small and B., Barkat, Low-frequency passive seismic experiments in Abu Dhabi, United Arab Emirates: implications for hydrocarbon detection, *Geophysical Prospecting*, 2009, - 1–25.

Bonnefoy-Claudet, S., F., Cotton and P.Y., Bard, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies – A literature review, *Earth-Science Reviews* v. *79*, 2006, - 205–227.

Chutov, G. J., E. D., Rode, J., Moritz, Method for direct hydrocarbon reservoir detection and delineation by low frequency acoustic spectroscopy, 2002, Patent N0.: US 6,473,695 B1.

Dangel, S., M.E., Schaepman, E.P., Stoll, R. Carniel, O. Barzandji, E.D., Rode, J.M., Singer. Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs. - *Journal of volcanology and geothermal research,* 128, 2003, - 135-158.

Draganov, D., K., Wapenaar, W., Mulder, J., Singer and A., Verdel, Retreival of reflections from background-noise measurements, *Geophysical Research Letters v. 34*, 2007, L04305.

Draganov, D., X., Campman, J., Thorbecke, A., Verdel and K., Wapenaar, Subsurface structure from ambient seismic noise, *71st EAGE meeting,* 2009*, Expanded Abstracts*, Z038.

Graf, R., S. M., Schmalholz, Y., Podladchikov, E.H., Saenger, Passive low frequency spectral analysis: Exploring a new field in geophysics, *World Oil*, 2007, 47-52.

Goloshubin, G.M., V. A., Korneev, and V. M., Vingalov, Seismic low-frequency effects from oil-saturated reservoir

zones: *72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 2002, - 1813-1816.

Holzner, R., P., Eschle, H., Zurcher, M., Lambert, R., Graf, S., Dangel and P.F., Meier, Applying microtremor analysis to identify hydrocarbon reservoirs, *First Break 23*, 2005, - 41–46.

Longuet-Higgins, M.S., A theory of the origin of microseisms. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 243, 1950, - 1–35.

Martakis, N., S., Kapotas, and G. A., Tselentis, Integrated Passive Seismic Acquisition And Methodology. *Case Studies: Geophysical Prospecting v. 54*, 2006, - 829–847.

Maxwell, S.C., T.I., Urbancic, The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field, *Leading Edge*, v. 20, 2001, - 636–639.

Mueller, M., Why passive seismic in the Gulf of Mexico will benefit the oil industry, regulators and a concerned public, *MicroSeismic,* 2012, - 2-5.

Okada, H., The microtremor survey method, Society of Exploration Geophysicists, *Geophysical Monograph Series No. 12.* 2003, - 20.

Peterson, J., Observations and modeling of seismic background noise, US Geological Survey, *Open File Report 93–322*, 1993, - 1–95.

Saenger, E. H., A hydrocarbon microtremor survey over a gas field: Identification of seismic attributes, *76th Ann. Internat. Mtg., Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 2007, - 1277–1281.

Sitinjak, R., E., Sumarsono, B., Suherman, Low frequency passive seismic method as a hydrocarbon indicator in the trembes area, east java basin, *38th Annual Convention of the Indonesian Petroleum Association,* 2014, G-171.

Webb, S.C., The Earth's 'hum' is driven by ocean waves over the continental shelves, *Nature v. 445*, 2007, - 54–756.

Yamanaka, H., M., Dravinski and H., Kagami, Continuous measurements of microtremors on sediments and basement in Los Angeles, California, *Bulletin of the Seismological Society of America 83*, 1993, - 1595–1609.

Zhang, H., S., Sarkar, M. N., Toksoz, H. S., Kuleli, and F., Al-Kindy, Passive seismic tomography using induced seismicity at a petroleum field in Oman, *Geophysics v. 74*, 2009, WCB57-WCB69.

Статията е рецензирана от проф. дгн Стефан Димовски и е препоръчана за публикуване от кат. "Приложна геофизика".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ХИДРОГЕОЛОЖКИ МОДЕЛ НА ВЛИЯНИЕТО НА РЕКА ДУНАВ ВЪРХУ НИВОТО НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ И ВЪЗМОЖНО НАВОДНЯВАНЕ НА ПРОЕКТНИЯ БЛОК-7 НА АЕЦ „КОЗЛОДУЙ"

Николай Тонев Стоянов

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

РЕЗЮМЕ. Представен е общ концептуален модел на хидрогеоложките условия в границите на определените алтернативни площадки за нова ядрена мощност - Блок 7 на АЕЦ „Козлодуй". Моделът е съставен след систематизиране на събраната климатична, геолого-тектонска, хидроложка, хидрогеоложка и техногенна информация за района на централата и подробен анализ на проведените детайлни сондажни, геофизични и опитно-филтрационни изследвания на територията на площадките. Посредством компютърна програма Modflow е разработен тримерен (3D) нестабилизиран филтрационен модел, базиран на приетата обща концепция. С него се симулират промените в структурата на филтрационното поле при отчитане на конкретната хидрогеоложка обстановка и непрекъснато изменение на нивото в р. Дунав. Въз основа на моделните решения е направена количествена оценка за покачването и спадането на нивата на подземните води в обхвата на алтернативните площадки и прилежащите площи до р. Дунав, като са прогнозирани възможностите и размерите на евентуалното им наводняване.

HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE DANUBE RIVER INFLUENCE OVER THE GROUNDWATER LEVEL AND THE POSSIBLE FLOODING OF THE SUGGESTED FOR CONSTRUCTION BLOCK 7 OF NPP "KOZLODUY"

Nikolay Tonev Stoyanov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700; nts@mgu.bg

ABSTRACT. A general conceptual model of the hydrogeological conditions within the proposed alternative sites for the construction of a new nuclear power facility - Block 7 of NPP "Kozloduy" is presented. The model is developed after a systematization of the collected climatic, geological, tectonic, hydrological, hydrogeological, and technogenic information about the nuclear plant area and a detailed analysis of the conducted detailed borehole, geophysical and experimental filtration tests on the proposed alternative sites. Applying the computer program Modflow, a three-dimensional (3D) non-stabilized filtration model, based on an accepted general conception, is developed. This model is used for simulating the changes in the filtration field after taking into account the specific hydrogeological conditions and the continuous fluctuations of the water level in the Danube River. Based on the obtained model solutions, is developed a quantitative estimation for the rise and the drop of groundwater levels in the range of the proposed alternative sites and in the areas adjacent to the Danube River, and that is used for predicting the possibilities and the dimensions of their possible flooding.

Въведение

Първите хидрогеоложки проучвания в Козлодуйската низина са проведени преди 50-60 години във връзка с отводняването на ниските заливни части на речната тераса. По-задълбочените изследвания започват в края на 60-те години на XX век с предпроектните проучвания за изграждане на АЕЦ "Козлодуй". Впоследствие, изследванията продължават във връзка с изграждането на нови ядрени мощности. През последните десетилетия в района на централата се проучват усилено няколко площадки за построяване на депо за временно съхранение на радиоактивни отпадъци, а преди три години стартира проучването на четири алтернативни площадки за изграждане на нова ядрена мощност (Блок 7). Резултатите от проучванията са отразени в голям брой производствени отчети, научно-изследователски доклади и статии (Гълъбов и др., 1992; Евстатиев и др., 2004; Карастанев и др., 2007; Стойнев и др., 2009, 2013; Стоянов, 2009; Димовски и др., 2014 и много други). Основни теми в докладите и статиите са свързани с изясняване на геолого-тектонските, хидрогеоложките и инженерногеоложките условия в района на централата; отводняване на строителните изкопи; изследване на миграцията на радионуклидите в подповърхностното пространство и подземните води; оценка на естествената защитеност на геоложката основа и др. Хидрогеоложките изчисления и прогнози са правени предимно в условията на стабилизиран режим на филтрация или са разглеждани различни варианти на стационарно филтрационно поле при високи и ниски нива в р. Дунав (Стоянов, 2012; Гиргинов, 2015 и др.).

Настоящото изследване е посветено на един слабо застъпен до момента проблем, свързан с количествената оценка на влиянието на р. Дунав върху нивото на подземните води при отчитане на непрекъснатото изменение на речното ниво. Посредством филтрационен нестационарен 3D модел е направена прогноза за възможното наводняване на проучените алтернативни площадки за изграждане на Блок 7. Моделът е съставен с компютърна програма Modflow (Harbaugh et all, 2000; и др.).

Концептуален модел

Математическият нестационарен 3D модел за оценка на влиянието на р. Дунав върху нивото на подземните води и възможното наводняване на проектния Блок-7 на АЕЦ „Козлодуй" е разработен при следните изходни условия:

- *Моделна област*. В план обхваща района на четирите площадки и прилежащите територии между склоновата част на льосовия комплекс и р. Дунав (фиг. 1). Включва всички нискорангови хидрогеоложки единици в разреза до дълбочина 40-50 m.
- *Хидрогеоложки единици*. Въз основа на проведените детайлни проучвания в района на четирите площадки (Стойнев и др., 2013, Димовски и др., 2014) и преинтерпретацията на по-старите архиви, в границите на изследваната част от подповърхностното пространство се отделят 10 ниско рангови хидрогеоложки единици (ХГЕ). В дълбочина те се разкриват в следната последователност: ХГЕ1 – льосов комплекс (льос, льосовидна глина и глинест пясък); ХГЕ2 - алувиални глини; ХГЕ3 - алувиален чакъл и чакълеста глина (стари тераси); ХГЕ4 - алувиален дребен чакъл и пясък (надзаливна и заливна тераса); ХГЕ5 - алувиален чакъл и пясък (заливна тераса); ХГЕ6 - алувиален чакъл (заливна тераса); ХГЕ7 - глина с пясъчни прослойки (Брусарска свита); ХГЕ8 - дребен пясък (Брусарска свита) ХГЕ9 - глина (Брусарска свита); ХГЕ10 - глина с пясъчни прослойки (Брусарска свита). Така дефинираните ХГЕ имат сложни пространствени форми и различно присъствие в обхвата на моделната област. Релефът на техните долнища и горнища са определени след прецизен анализ на резултатите от проведените на четирите площадки детайлни сондажни и геофизични проучвания, както и на информацията от изпълнените през последните 30-40 години геоложки и хидрогеоложки проучвания в района на Централата.
- *Хидрогеоложки параметри*. Приетите изчислителни стойности на коефициента на филтрация (k) и коефициента на водоотдаване (μ) на ниско ранговите ХГЕ са представени в таблица 2.
- *Структура на подземния поток*. Изцяло се контролира от колебанията на нивата в р. Дунав и от дренажните канали (отводнителната система). При ниски нива целият подземен поток е насочен в посока N-NE - към реката (Гълъбов и др., 1992). При високи нива подземният поток в северната половина на заливната тераса е обърнат от реката към пласта, т.е. към дренажните канали, а в цялата надзаливна тераса и южната половина на заливната тераса потокът запазва своята посока на N-NE.
- *Гранични условия*.

  (А) Река Дунав. Основен фактор, който контролира структурата на филтрационното поле. Използваният в нестационарния модел осреднен хидрограф на р. Дунав (табл. 1 и фиг. 2) е съставен по данни от системните наблюдения на водните стоежи в организирания за нуждите на централата водомерен пост ВП БПС-1, открит при km 687,000 през 1980 г (Стойнев, 2013 и др.).

  (Б) Дренажни канали. Главен фактор за понижаване на подземните води при високи нива в р. Дунав и в голяма степен определящ структурата на филтрационното поле. Без особено значение при ниски нива в реката.
- *Инфилтрационно подхранване от валежите.* В моделната област, с оглед различната водопропускаща способност на покривните слоеве, са отделени две зони:
  - Зона W1. Обхваща ниската тераса на р. Дунав, където приповърхностната част на разреза е представен от алувиални глини (ХГЕ2).
  - Зона W2. Заема южната половина на района, в която приповърхностния разрез е представен от седиментите на льосовия комплекс (ХГЕ1).

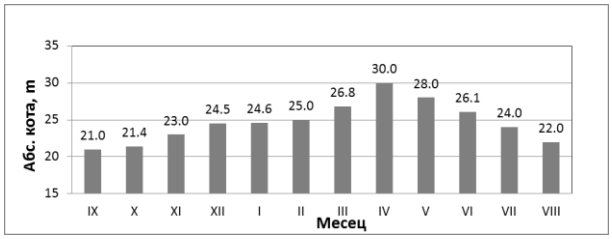
  Изчислителните средномесечни стойности на скоростите на инфилтрация (W_1 и W_2) за двете зони са определени по формулата на Bredencamp (1990) и данни за средномесечния валеж в района на централата (табл. 1).
- *Подземен поток по южната граница на моделната област*. Формира се от подземните води в пясъчните пластове на Брусарската свита (ХГЕ7, ХГЕ8 и ХГЕ10), чакълесто-глинестите наслаги на старите алувиални тераси (ХГЕ3) и льосовия комплекс (ХГЕ1). Дренира се подземно в чакълесто-песъчливите материали на надзаливната тераса (ХГЕ4).

Фиг. 1. Местоположение на обекта. Граници на моделната област

Таблица 1.

Средно месечни суми на валежа (P_i), средно месечни скорости на инфилтрация в зона 1 и зона 2 (W_1 и W_2) и средно месечни стоежи в р. Дунав (H_i)

Месец	P_i, mm	W_1, m/d	W_2, m/d	H_i, m
IX	57	1,30E-04	2,70E-04	21,0
X	40	8,90E-05	1,90E-04	21,4
XI	48	1,10E-04	2,30E-04	23,0
XII	36	8,10E-05	1,70E-04	24,5
I	28	6,30E-05	1,10E-04	24,6
II	37	8,30E-05	1,80E-04	25,0
III	30	6,70E-05	1,40E-04	26,8
IV	40	8,90E-05	1,90E-04	30,0
V	71	1,60E-04	3,40E-04	28,0
VI	76	1,70E-04	3,60E-04	26,3
VII	65	1,50E-04	3,10E-04	24,0
VIII	67	1,50E-04	3,20E-04	22,0

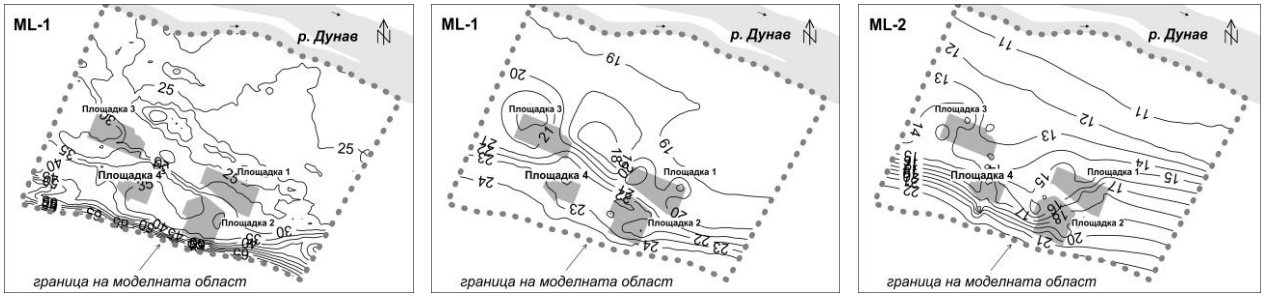


Фиг. 2. Средно месечни стоежи в р. Дунав (осреднен хидрограф)

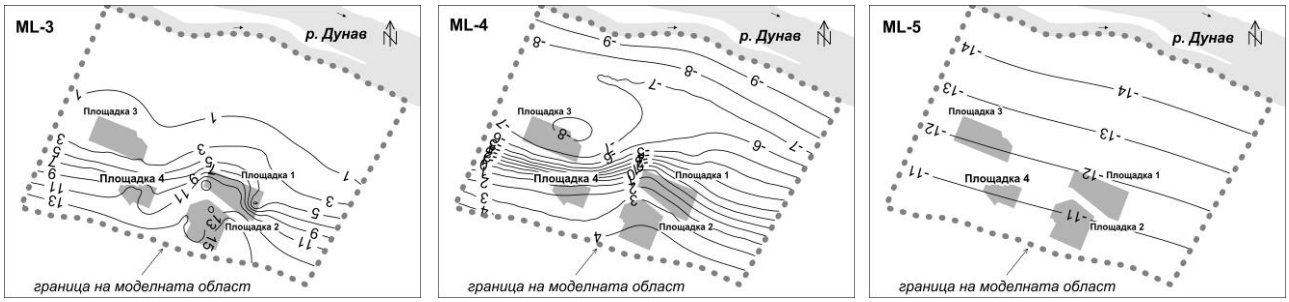
Таблица 2.

Характеристики на ниско ранговите хидрогеоложки единици (ХГЕ). Моделни пластове и моделни зони

ХГЕ	Моделен пласт	Моделна зона	Литоложко описание	Средна дебелина от - до -	Коеф. на филтрация k, m/d	Коеф. на водоотдаване μ, -
ХГЕ1	ML-1	MZ-1.1	Льосов комплекс (льос, льосовидна глина и глинести пясък)	5 - 10	0,25	0,01
ХГЕ2		MZ-1.2	Алувиални глини	3 - 7	0,02	0,005
ХГЕ3	ML-2	MZ-2.1	Алувиален чакъл и чакълеста глина (стари тераси)	1 - 3	7,5	0,10
ХГЕ4		MZ-2.2	Алувиален дребен чакъл и пясък (надзаливна и заливна тераса)	5 - 9	30,0	0,15
ХГЕ5		MZ-2.3	Алувиален чакъл и пясък (заливна тераса)	6 - 8	80,0	0,20
ХГЕ6		MZ-2.4	Алувиален чакъл (заливна тераса)	3 - 5	120,0	0,25
ХГЕ7	ML-3	MZ-3.1	Глина с пясъчни прослойки (Брусарска свита)		0,1	0,01
ХГЕ8		MZ-3.2	Дребен пясък (Брусарска свита)	1 - 8	2,5	0,04
	ML-4	MZ-4.1				
ХГЕ9		MZ-4.2	Глина (Брусарска свита)	3 - 10	0,005	0,008
ХГЕ10	ML-5	-	Глина и глина с пясъчни прослойки (Брусарска свита)	> 30	0,1	0,01



Фиг. 3. Релеф на горнището и долнището на моделен пласт ML-1 и долнището на моделен пласт ML-2



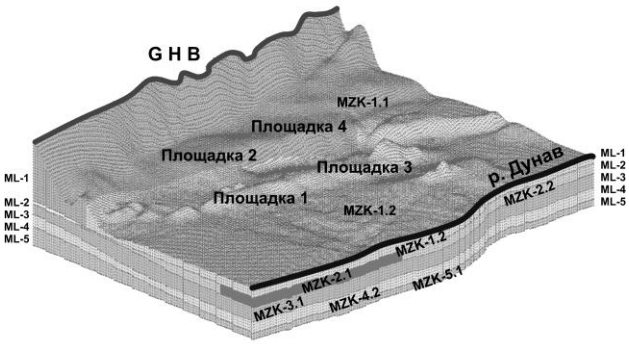
Фиг. 4. Релеф на долнищата на моделни пластове ML-3, ML-4 и ML-5

Композиране на нестационарния филтрационен 3D модел

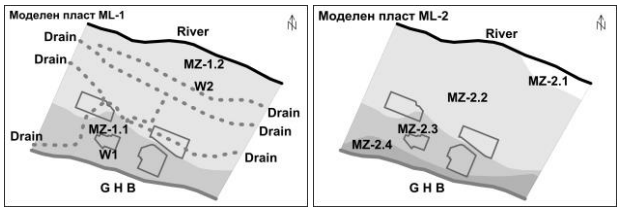
Нестационарният 3D модел представлява тримерна симулация на структурата на подземния поток в условията на непрекъсното изменение на нивата, разхода и останалите елементи на филтрационното поле. При неговото композиране са използвани следните основни техники, схеми и входни параметри:

- Моделът е съставен съобразно постановките, изложени в концептуалния модел и програма Modflow.
- Моделната област обхваща четирите алтернативни площадки и прилежащите им територии до р. Дунав (фиг. 1). Общата площ на модела е около 23,7 km^2.
- Пространствената дискретизация е направена като е използвана равномерна ортогонална мрежа със 180 реда, 230 колони и 5 моделни пласта. В моделните пластове са детерминирани 10 моделни зони (табл. 2). Техните граници са илюстрирани на фигури 5, 6 и 7.
- Релефът на ограничителните повърхнини (т.нар. долнища и горнища) на моделните пластове са съобразени с морфологичните особености на терена и пространствените форми на ХГЕ (фиг. 3 и 4). Земната повърхност е зададена като горнище на ML-1.
- В рамките на моделни пластове и зони филтрационни характеристики са постоянни. Те са зададени съобразно приетите за всеки пласт и зона стойности (табл. 2). За коефициента на филтрация във всички моделни пластове е прието практикуваното в моделирането съотношение $k_x = k_y = 10k_z$.
- Регионалният поток е моделиран с разход по част от външните граници на моделната област по схемата GHB. Използваната проводимост по границата е изчислена съобразно дебелината на моделния пласт и коефициента на филтрация в пласта или зоната, в която попада съответната моделна клетка.

- Река Дунав е симулирана като тримерен обект със съответната геометрия и хидравлични характеристики. Зададена е с гранично условие от III род (River) при отчитане на непрекъснато изменение на речното ниво във времето h = f (t). Като входни данни са използвани определените средномногогодишни месечни стоежи на реката в рамките на хидроложкия цикъл. Амплитудата на минималните и максимални речни нива обхваща интервала между абсолютни коти 21,0 и 30,0 m.
- Дренажните канали са зададени като тримерни обекти в първия моделен пласт при допускане, че между тях и вместващите ги литоложки разновидности съществува пряка хидравлична връзка. Геометрията и хидравлични характеристики на съоръженията са приети съобразно техните реални размери, координати и конструктивни особености. Зададени са с гранично условие от III род (Drain). Приетите стойности на нивата от запад на изток в южния канал са в диапазона от кота 24,0 m до кота 23,0 m, а в северния канал от кота 22,6 m до кота 21,6 m.
- Инфилтрационното подхранване е зададено в ML-1 с гранично условие подхранване (Recharge). Дефинирани са две моделни зони – Зона W1 и Зона W2 (фиг. 6а). За скоростите на инфилтрация W_1 и W_2 в двете зони са приети изчислените средномесечни стойности (табл. 1).
- Общото време за симулация е разделено на 12 стрес периода, като във всеки от тях са задавани съответните средномесечни стойности на водните стоежи в р. Дунав (H_i) и скоростите на инфилтрация W_{1i} и W_{2i}.

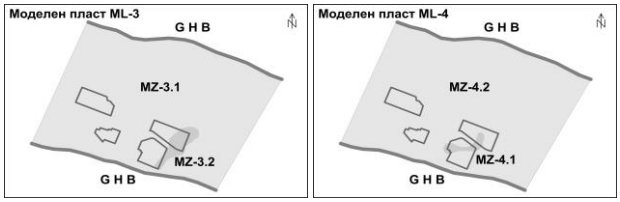


Фиг. 5. Геометрия на моделните пластове и зони. Гранични условия



(а) (б)

Фиг. 6. Моделни зони и гранични условия в ML-1 и ML-2



(а) (б)

Фиг. 7. Моделни зони и гранични условия в ML-3 и ML-4

Прогнозни решения. Дискусия

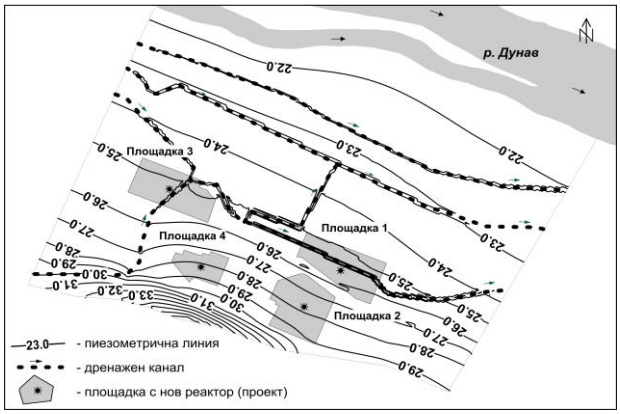
Основните резултати от направените със съставения нестационарен 3D модел симулации са илюстрирани в обобщен вид в таблица 3 и с поредица от пиезометрични карти (фигури от 8 до 19).

Таблица 3.
Прогнозни коти (m) по месеци на нивото на подземните води h_i в централните части на площадките

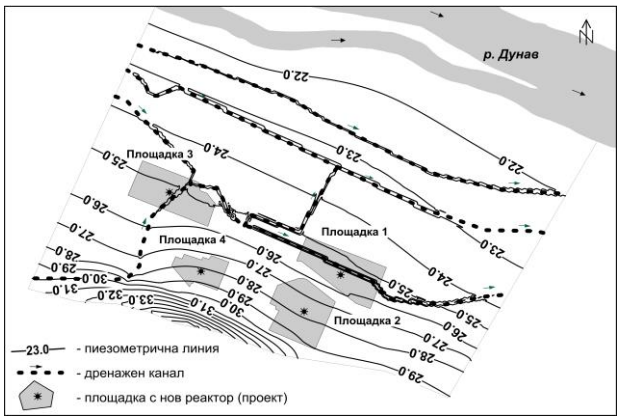
Месец	Площадка 1	Площадка 2	Площадка 3	Площадка 4
IX	25,59	27,75	25,26	28,28
X	25,51	27,72	25,15	28,25
XI	25,52	27,71	25,21	28,24
XII	25,46	27,69	25,17	28,22
I	25,39	27,65	25,14	28,18
II	25,43	27,63	25,22	28,17
III	25,43	27,61	25,26	28,15
IV	25,50	27,61	25,37	28,15
V	25,73	27,67	25,62	28,20
VI	25,88	27,72	25,83	28,26
VII	25,98	27,76	25,95	28,30
VIII	26,11	27,82	26,06	28,36
Δhj, m	0,72	0,21	0,92	0,21

Посочените в таблица 3 стойности представят по месеци прогнозните коти на подземните води (h_i) на територията на всяка площадка като функция на средномесечните нива в р. Дунав (H_i) и средномесечната валежна инфилтрация (W_{1i} и W_{2i}), т. е. $h_i = f (H_i, W_{1i}, W_{2i})$. Представените резултати показват, че годишната амплитуда на изменение на нивото (Δh_j) за Площадки 1 и Площадка 3 (в ниската тераса) е по-малка от метър, съответно за Площадка 1 амплитудата е 0,72 m, а за Площадка 3 - 0,92 m. За Площадки 2 и 4 (във високата тераса) тази амплитуда е още по-малка – едва 20-25 cm. Получените резултати са напълно логични и обясними. Всички теоретични и полеви изследвания сочат, че преминаването на една висока вълна в реката предизвиква подобна вълна, проникваща напречно във водоносния пласт, но с известно закъснение и с намалена амплитуда (което се потвърждава и от получените моделни решения). Конкретно за условията в обсега на АЕЦ „Козлодуй“, амплитудата на колебанията на подземните водни нива е редуцирана допълнително от влиянието на отводнителната система (дренажните канали).

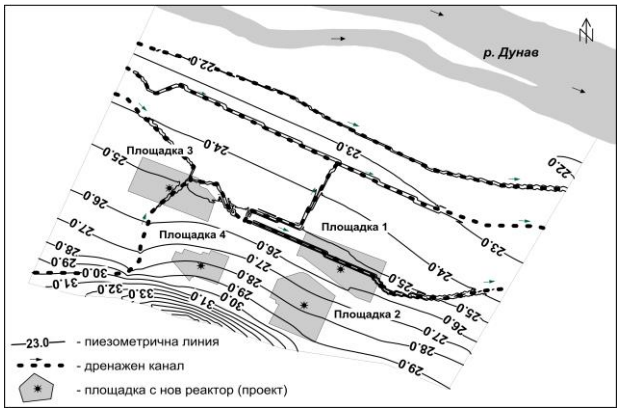
По-цялостна представа за влиянието на реката върху подземните води в Козлодуйската низина дават съставените пиезометрични карти за различните месеци от годината. Те показват промените в структурата на подземния поток (посоки на течението, градиенти и пр.) в течение на хидроложкия цикъл. Прави впечатление, че във високата речна тераса подземният поток е практически неизменен като направление и отток, докато в ниската заливна тераса и по-точно в северната й част, в близост до р. Дунав има алтернативна смяна на посоката на потока в зависимост от нивото в реката. Моделните решения нагледно представят влиянието и на отводнителната система от канали, която в значителна степен контролира нивата в централната и южната части на низината.



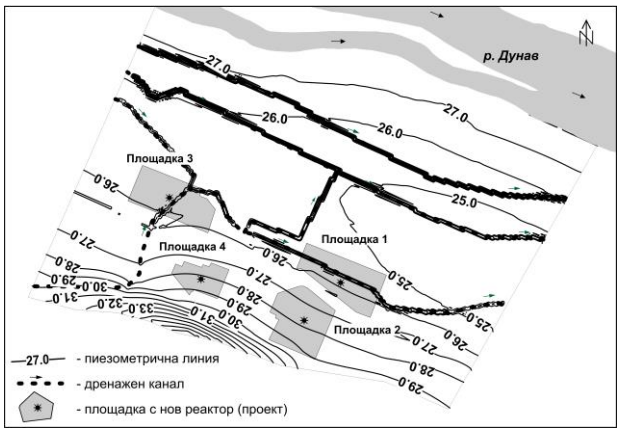
Фиг. 8. Структура на подземния поток към месец септември



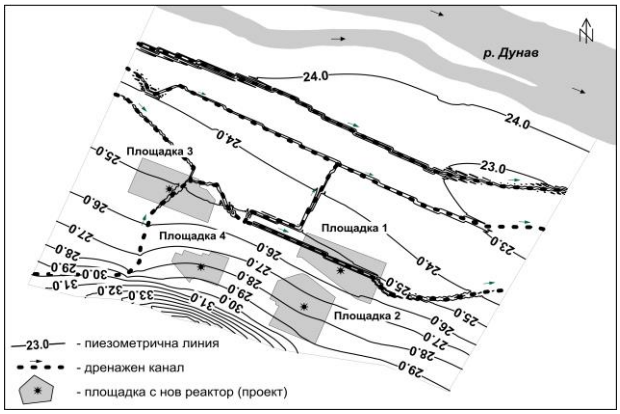
Фиг. 9. Структура на подземния поток към месец октомври



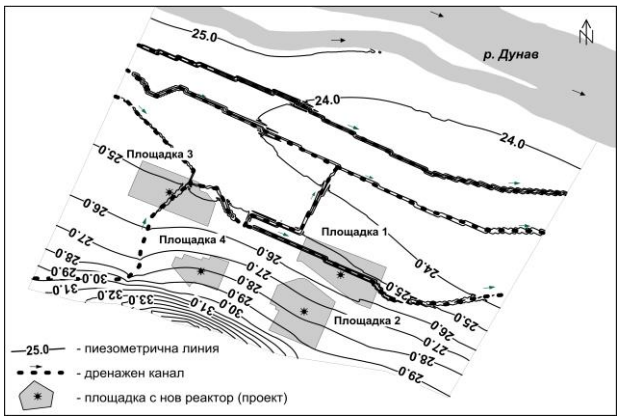
Фиг. 10. Структура на подземния поток към месец ноември



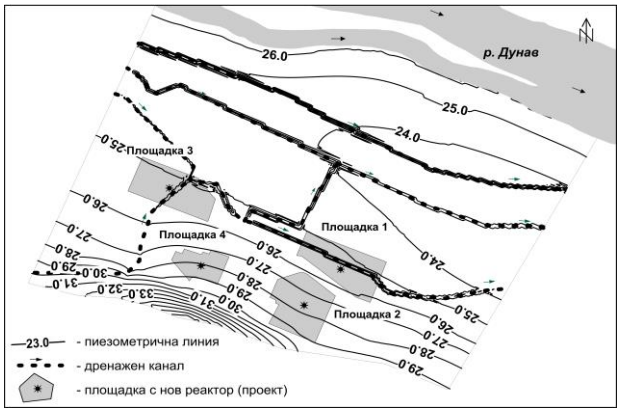
Фиг. 11. Структура на подземния поток към месец декември



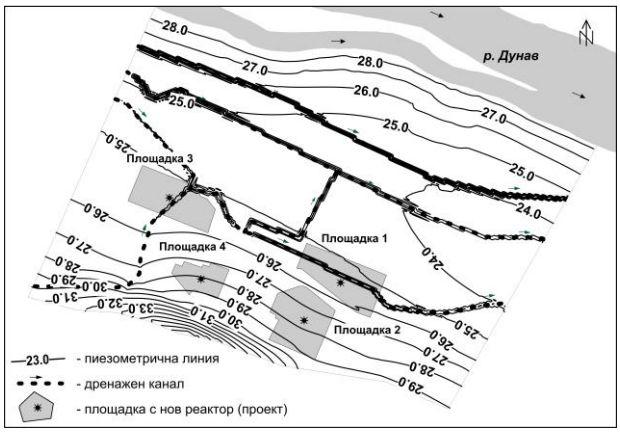
Фиг. 12. Структура на подземния поток към месец януари



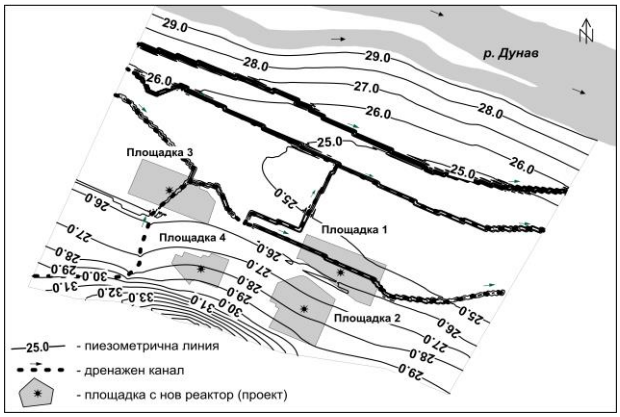
Фиг. 13. Структура на подземния поток към месец февруари



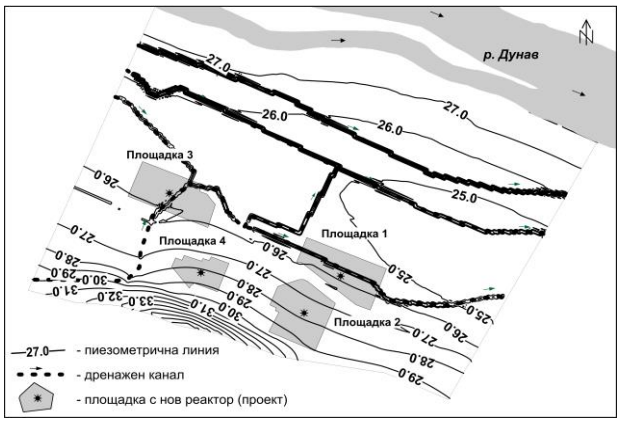
Фиг. 14. Структура на подземния поток към месец март



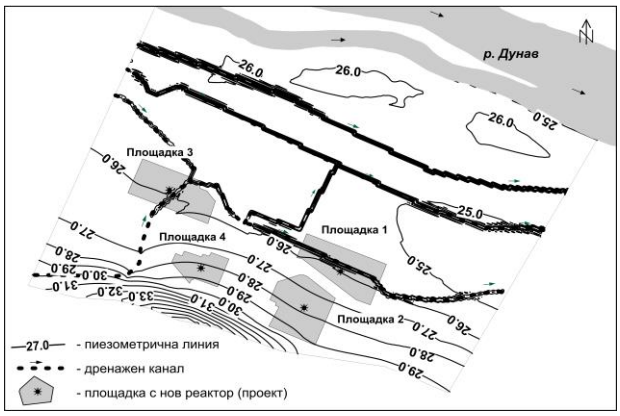
Фиг. 15. Структура на подземния поток към месец април



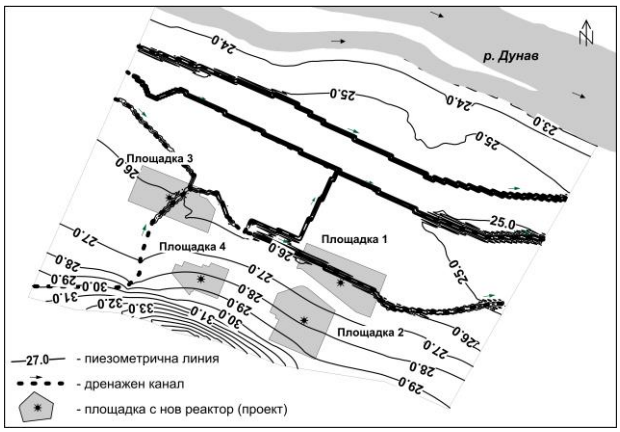
Фиг. 16. Структура на подземния поток към месец май



Фиг. 17. Структура на подземния поток към месец юни



Фиг. 18. Структура на подземния поток към месец юли



Фиг. 19. Структура на подземния поток към месец август

Заключение

Проведените математически моделни изследвания показват, че измененията на нивото на подземните води, предизвикани от колебанията на нивото в р. Дунав, са незначителни и при четирите площадки. В обхвата на площадки 1 и 3 годишната амплитуда е между 0,5 и 1,0 m, а при площадки 2 и 4 е около 0,2–0,3 m. Тези изменения не застрашават по никакъв начин проектния Блок 7 на АЕЦ „Козлодуй" от подземно оводняване и заливане.

Литература

Гиргинов, П. Оценка на ролята на вертикалната филтрация на подземните води в обсега на АЕЦ „Козлодуй". - *Год. МГУ "Св. Ив. Рилски", т. 58, св. I, Геол. и геоф.*, 2015. - 220-225.

Гълъбов, М. (ред). *Изясняване на дисперсионните характеристики на почвената и водната среда в района на площадката на АЕЦ „Козлодуй" с цел анализиране на възможните пътища за миграция на радионуклиди от АЕЦ в почвата и атмосферата.* Доклад на „Акватер", 1992.

Димовски, Ст., Н. Стоянов, Ст. Стойнев, М. Янкова. Електротомографско картиране на земната основа на алтернативни площадки за изграждане на нова енергийна мощност в АЕЦ Козлодуй. - *Год. МГУ "Св. Ив. Рилски" т. 57, св. I, Геол. и геоф.*, 2014. - 83-88.

Евстатиев, Д. (ред). *Проучвателни работи във връзка с „Реконструкция на хранилище за РАО в могилник за твърди РАО".* Доклад на ГИ БАН, 2004.

Карастанев Д. (ред). *Характеризиране на площадка № 4*. Доклад на ГИ БАН, 2007.

Стойнев Ст. (ред). *Потвърждаване на площадка за изграждане на НХРАО*. Доклад на „МГУ - Инженеринг", 2009.

Стойнев, Ст. (ред). *Изследване и определяне местоположението на нова ядрена мощност на площадката на „АЕЦ Козлодуй".* Доклад на „МГУ - Инженеринг", 2013.

Стоянов, Н. *Прогнозиране* на възможната миграция на радионуклиди през льосовия комплекс в района на АЕЦ "Козлодуй". - *Год. МГУ "Св. Ив. Рилски" т. 52, св. I, Геол. и геоф.*, 2009. - 159-164.

Стоянов, Н. Моделни изследвания на риска от замърсяване на геоложката основа и подземните води от проектираното Национално хранилище за радиоактивни отпадъци край АЕЦ „Козлодуй". - *Год. МГУ "Св. Ив. Рилски" т. 55, св. I, Геол. и геоф.*, 2012. - 140-145.

Bredencamp, D. Quantitative estimation of groundwater recharge by means of a simple rainfall-recharge relationship. – *In: International Contributions in Hydrogeology, v. 8, "Groundwater recharge"*, 1990. - 247-256.

Harbaugh A., E. Banta, M. Hill, M. McDonald. *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model – user guide to modularization concepts and the groundwater flow process.* Open-File Report 00-92, USGS, Reston, VA, 2000. - 130 p.

Статията е рецензирана от проф. дгн Михаил Гълъбов и е препоръчана за публикуване от кат. "Хидрогеология и инженерна геология.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

МОДЕЛИ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА КАРСТОВИЯ ВОДОНОСЕН ХОРИЗОНТ ОТ СТАРОТО И НОВОТО ДЕПО ЗА БИТОВИ ОТПАДЪЦИ НА ГРАД ПАЗАРДЖИК

Николай Стоянов, Стефан Димовски

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

РЕЗЮМЕ. Използван е комплексен подход за моделиране на замърсяването на подповърхностното пространство и подземните води от депа за отпадъци в карстови райони. Проведено е електротомографско проучване за установяване на окарстени зони и детайлизиране на хидрогеоложките условия в района на старото и новото депо за битови отпадъци на гр. Пазарджик. Съставени са двумерни (2D) хидрогеоложки модели на условията за преминаване на сметищни води през зоната на аерация и разпространението им в подземните води. В различни моделни варианти е изследвано поведението на силно и слабо подвижни замърсители по примера на хлоридните и амониевите йони (Cl и NH_4). Направена е оценка на досегашното замърсяване от старото депо и прогноза за развитието на негативните процеси след неговата рекултивация при отчитане ролята на горния противофилтрационен екран. Прогнозирано е и възможното замърсяване на карстовия резервоар от новото депо, като е направена оценка на защитния ефект на глинестия пласт в долния противофилтрационен екран и на задържащата способност на геоложката основа.

MODELS OF CONTAMINATION IN THE KARST AQUIFER CAUSED BY THE OLD AND THE NEW LANDFILL OF PAZARDZHIK

Nikolay Stoyanov, Stefan Dimovski
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; nts@mgu.bg, dimovski@mgu.bg

ABSTRACT. A comprehensive approach for modeling the subsurface space and groundwater pollution caused by landfills in karst areas is applied. An electrical tomography surveying was performed in order to study the karst areas and to obtain a detailed picture of the hydrogeological conditions in the area of the old and the new landfill of Pazardzhik. Two-dimensional (2D) models of the hydrogeological conditions for the landfill leachate passage through the unsaturated zone and its spread into groundwater are developed. Different model variants are used in order to study the behavior of contaminants characterized by high and by low mobility on the example of chloride and ammonium ions (Cl and NH_4). An evaluation of the current contamination caused by the old landfill was performed and a forecast for the development of possible negative processes after its recultivation was done taking into account the role of the upper insulating screen. The potential contamination of the karst reservoir caused by the new landfill is predicted after assessing the protective effect of the clay layer in the bottom insulating screen and the retention capacity of the geological base.

Въведение

Математическите моделни изследвания през последните 15-20 години се прилагат много успешно за изследване и прогнозиране на замърсяването на подповърхностното пространство и подземните води от депа за битови отпадъци (ДБО). Най-често обект на изследване са ненаситената и водонаситената зона в поров тип колектори – хидрогеоложки единици, изградени от несвързани и/или полусвързани литоложки разновидности (Стоянов, 2003, 2007; Stoyanov and Dimovski, 2004 и много други). Математически модели са прилагани и при изследване на процесите на замърсяване от ДБО в пукнатинни колектори (Стоянов, 2010).

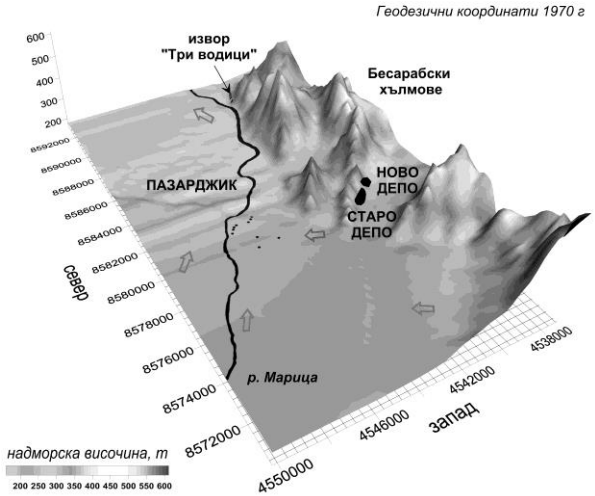
Обект на настоящето изследване е карстов масив, върху който са разположени старото и новото ДБО на гр. Пазаржик (фиг. 1). В района на депата е проведено електротомографско проучване за детайлизиране на хидрогеоложкия строеж и за локализиране на карстови зони. Посредством математически хидрогеоложки 2D модели са симулирани условията за миграция на силно и слабо подвижни замърсители (по примера Cl и NH_4) през зоната на аерация и във водонаситената зона. С тях е направена оценка на замърсяването от старото депо, както и дългосрочна прогноза за развитието на миграционните процеси след неговата рекултивация. Прогнозирано е и възможното замърсяване на карстовия водоносен хоризонт от новото депо, като е оценен защитният ефект на долния глинест противофилтрационен екран и на задържащата способност на геоложката основа. Моделите са разработени с програма VS2DTI (Healy, 1990 и др.).

Обща характеристика на изследвания обект

Старото и новото ДБО на гр. Пазаржик са ситуирани в обхвата на карстов водоносен хоризонт, известен в литературата като Перущица-Огняновски карстов басейн (Антонов и Данчев, 1980). Хоризонтът е формиран в окарстените мрамори и мраморизирани варовици от Добростанската мраморна свита. Басейнът е привързан към блоково разломеното бедро на Северородопската антиклинала между р. Чепинска и р. Въча. В резултат на тектонски движения част от скалните блокове са погребани в дълбочина, а други афльорират на повърхността. Двете депа са разположени в разкритата северозападна част на басейна, в района на Бесапарските хълмове (фиг. 1) –

хорстови структури от мрамори, прослоени от гнайси и гнайсо-шисти. Мраморният комплекс е интензивно напукан и окарстен. В него е формиран карстов поток с генерална посока на север. Модулът на подземен отток е 8,6 (l/s)/km^2.

По данни от сондажното проучване на геоложката основа на депата е установено, че горната част на разрез е изградена от глини и песъчливи глини, чиято дебелина варира от 0,3 m (С- 5) до 12-15 m (С-1, С-6). Под глините се разкрива скална подложка от мрамори (С-1, С-2, С-3, С-4, С-5 и С-6), а в СИ част на участъка – от гнайсошисти (С-7) и гнайси (С-8).

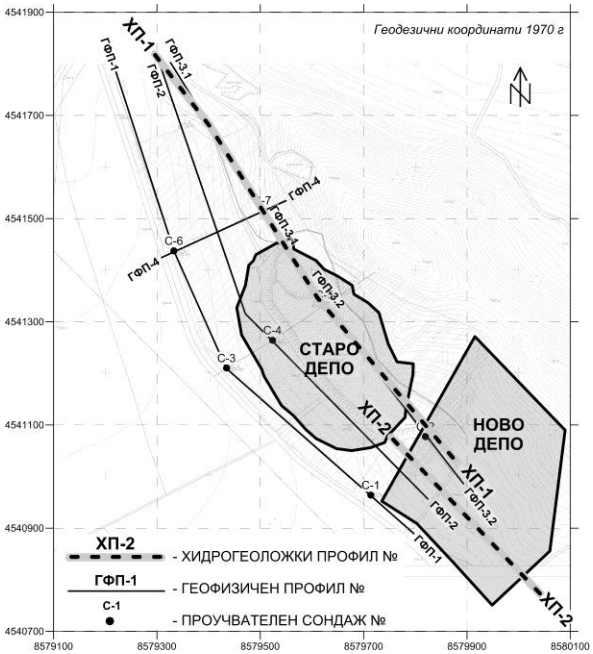


Фиг. 1. Местоположение на изследвания обект

Старото депо се експлоатира от началото на 60-те години на XX век. Отпадъците се депонират в изкопите на стара мраморна кариера без полагане на изолиращ слой. Това създава благоприятни условия за навлизане на "сметищните" води в дълбочина и за замърсяване на подземните води. Експлоатацията на старото депо приключва през 2015 г. и върху сметищното тяло се полага изолационен екран, който не допуска инфилтрация на атмосферни и повърхностни води и рязко намалява продуцирания инфилтрат. Новото депо е проектирано в съответствие със законовите и нормативни документи, регламентиращи изграждането и експлоатацията на подобен тип обекти. За безопасното му функциониране проектът предвижда изграждане на защитни съоръжения и бариери, ограничаващи изтичането на течни емисии.

Геоелектрични модели

Проведено е електротомографско 2D проучване за конкретизиране на хидрогеоложкия разрез и локализиране на окарстени зони, зони с различна водопропускливост и замърсени зони под двете депа. Теренните измервания са изпълнени по схемата "полюс – дипол" по пет геофизични профила (фиг. 2). Регистрацията е извършена с Terrameter SAS 1000 - ABEM. Данните от измерванията са интерпретирани с програма RES2DINV (Loke, 2001).



Фиг. 2. Ситуация с разположението на двете депа, хидрогеоложките профили, геоелектричните профили и проучвателните сондажи

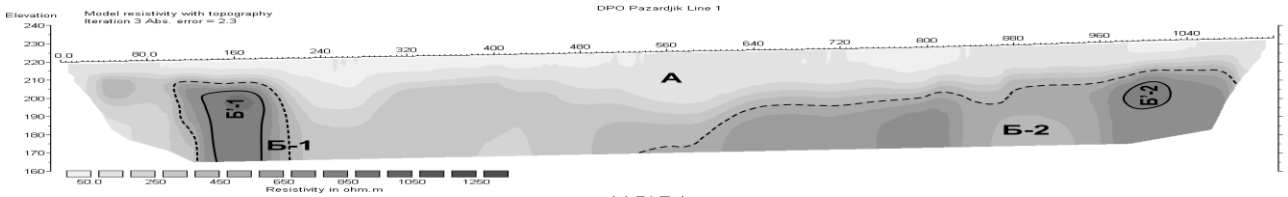
Анализът на интерпретираните резултати (фиг. 3 и 4) дава основание в разрезите по геофизичните профили да се отделят следните зони:

- приповърхностна част на геоложкия разрез (зона А), представена доминиращо от глини и глинитизирани скали с ниско електрично съпротивление (до 100 Ωm);
- скален масив с относително висока йонна електропроводност и ниско съпротивление (от 200 до 500 Ωm), представен от водонаситени напукани и окарстени мрамори (зона В);
- скален масив с плътна структура и високо (зони Б) и много високо (зони Б') съпротивление, съответно между 500 и 850 Ωm за зони Б и над 850 Ωm за зони Б';
- старо депо със силно изразена йонна проводимост и с много ниско съпротивление (до около 20 Ωm), което е вързано с високата минерализация на съдържащия се в него инфилтрат (зона С).

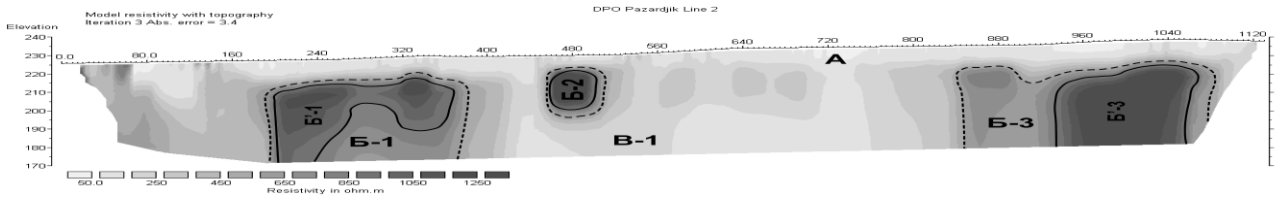
Хидрогеоложки строеж

Въз основа на комплексен анализ на информацията за проведените сондажни, геофизични и хидрогеоложки проучвания (Стойнев, 2007, 2011 и др.), в геоложката основа на двете депа се отделят пет ниско рангови хидрогеоложки единици (ХГЕ):

- *Проницаем пласт (ХГЕ1).* Обхваща глинесто-песъчливата покривка и горната силно изветряла част на скалния комплекс (мрамори и гнайси). Дебелината на ХГЕ1 варира в диапазона от 1-2 до 15-16 m и повече. Домининацията на глинестия фациес предполага ниска водопропускливост и относително висока задържаща способност филтрационната среда. В разглеждания район ХГЕ1 е неводонаситена. На практика тя изгражда големи части от зоната на аерация и е важна бариера за инфилтриращите се от повърхността замърсители.

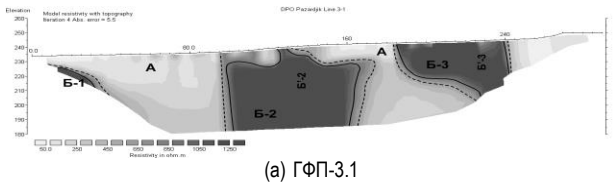


(а) ГФП-1

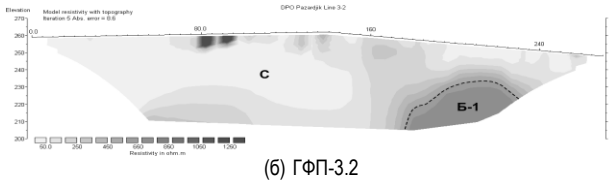


(б) ГФП-2

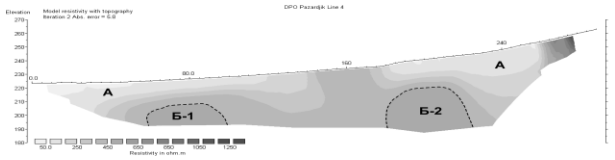
Фиг. 3. Разпределение на електричното съпротивление по геофизични профили ГФП-1 и ГФП-2



(а) ГФП-3.1



(б) ГФП-3.2



(в) ГФП-4

Фиг. 4. Разпределение на електричното съпротивление по геофизични профили ГФП-3.1, ГФП-3.2 и ГФП-4

- *Първа силно проницаема зона (ХГЕ2).* Формирана е в силно натрошените и окарстени участъци в мраморния комплекс. Развита е като вертикални или субвертикални издължени тела в масива, които изклинват в дълбочина. Отличава се с добра пропускливост и слаба задържаща способност, което я прави благоприятна среда за миграция на замърсители през зоната на аерация и за разпространение им във водонаситената зона.
- *Първа слабо проницаема зона (ХГЕ3).* Изградена е от здрави до слабонапукани мрамори с нищожна водонепропускливост. Навлизането и движението на замърсители в ХГЕ3 е възможно да се реализира единствено по дифузионен път, което предполага и силна ограниченост на миграционните процеси.
- *Втората силно проницаема зона (ХГЕ4).* Представена е от силно напукани до натрошени шисти и гнайсо-шисти. Притежава сравнително по-голяма водопропускливост и по-ниска задържаща способност. Това предполага по-интензивно развитие на миграционните процеси в тази част на подповърхностното пространство.
- *Втората слабо проницаема зона (ХГЕ5).* Включва здрави до слабонапукани шисти и гнайсо-шисти. Има изключително слаба водопропускливост и е основна бариера срещу замърсяването на подземните води. Границите, пространствените взаимоотношения и геометрията на установените ХГЕ в района на двете депа са илюстрирани на фигури 5 и 6.

Хидрогеоложки модели

Работните хипотези, използвани в хидрогеоложките 2D модели, са представени в таблица 1. С първите два модела (M2D-1 и M2D-2) се оценява естествената защита на геоложката среда под старото депо и ефекта от екологичните мерки след неговото закриване, а с модели (M2D-3, M2D-4, M2D-5 и M2D-6) се изследва естествената защита на геоложката основа под новото депо и ролята на проектирания глинест пласт в долния изолиращ екран.

Таблица 1.
Работни хипотези за хидрогеоложките модели

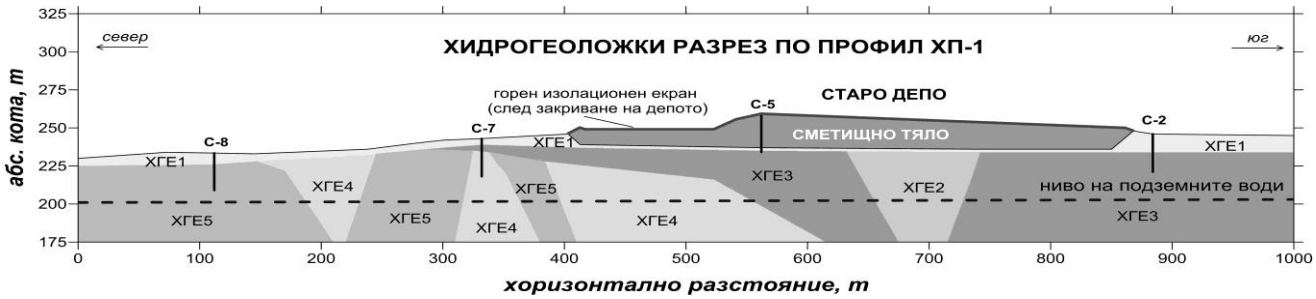
Модел	РАБОТНА ХИПОТЕЗА						
	Замърсител	Инженерна бариера	Миграционни процеси				
			Конвективен пренос	Сорбция	Молекулярна дифузия	Механична дисперсия	Смесване
СТАРО ДЕПО							
M2D-1	Cl	от 1960 до 2015 няма бариери	да	не	да	да	да
		след 2015 г горен пласт глини					
M2D-2	NH_4	от 1960 до 2015 няма бариери	да	да	да	да	да
		след 2015 г горен пласт глини					
НОВО ДЕПО							
M2D-3	Cl	няма бариери	да	не	да	да	да
M2D-4	NH_4	няма бариери	да	да	да	да	да
M2D-5	Cl	долен пласт глини	да	не	да	да	да
M2D-6	NH_4	долен пласт глини	да	да	да	да	да

Таблица 2.

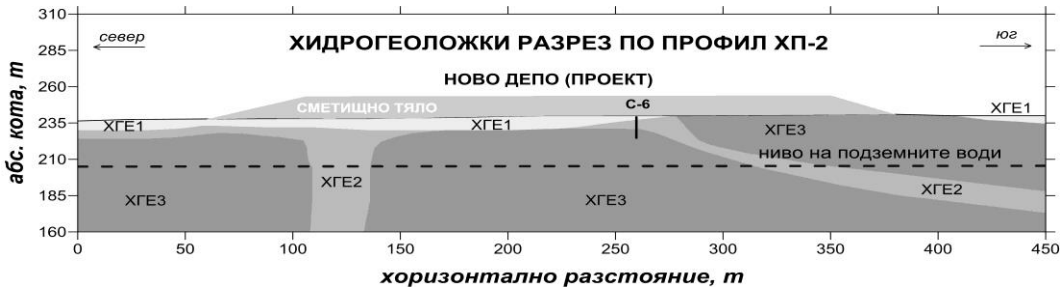
Физични, филтрационни и миграционни характеристики на хидрогеоложките единици и инженерни бариери

ХГЕ	Моделна зона mz №	Плътност на скелета ρ_d, mg/m^3	Коефициент на филтрация k, m/d	Коеф. на разпределение K_D за Cl^-, m^3/mg	Коеф. на разпределение K_D за NH_4^+, m^3/mg	Надлъжна дисперсивност α_L, m	Коеф. на дифузия D_M, m^2/d
ХГЕ1	MZ-1	2,01E+09	1,0E 00	2,49E-10	1,49E-09	2,5E 00	5,0E-04
ХГЕ2	MZ-2	2,35E+09	4,0E-01	8,51E-11	3,19E-10	1,5E+01	7,0E-04
ХГЕ3	MZ-3	2,51E+09	5,0E-03	1,99E-11	9,96E-11	1,2E 00	3,5E-04
ХГЕ4	MZ-4	2,23E+09	3,0E-02	3,59E-11	3,14E-10	1,5E 00	5,0E-04
ХГЕ5	MZ-5	2,29E+09	4,0E-03	1,31E-11	6,55E-11	5,0E-01	2,0E-04
ХГЕ6*	MZ-6	1,75E+09	1,0E-06	5,29E-10	1,71E-09	1,0E-02	1,0E-05

*Забележка: * ХГЕ6 – инженерна бариера (пласт от глина с дебелина 0,5 m в долния противофилтрационен екран на новото депо).*



Фиг. 5. Граници на хидрогеоложките единици в разреза по хидрогеоложки профил ХП-1 (ситуационният план е представен на фиг. 2)



Фиг. 6. Граници на хидрогеоложките единици в разреза по хидрогеоложки профил ХП-2 (ситуационният план е представен на фиг. 2)

Концептуална схема

Моделите са съставени при следните изходни позиции:

- *Моделна област.* В M2D-1 и M2D-2 обхваща разреза по профил ХГ1 в участъка на старото депо, а в M2D-3, M2D-4, M2D-5 и M2D-6 включва разреза по профил ХГ2 в участъка на новото депо (фиг. 2, 5 и 6).
- *Хидрогеоложки единици.* В хидрогеоложките модели в различна степен присъстват установените в геоложката основа на двете депа ХГЕ. В M2D-5 и M2D-6 противофилтрационният пласт от глина с дебелина 0,5 m, макар и изкуствена формация, се разглежда като хидрогеоложка единица от по-нисък ранг (ХГЕ6).
- *Хидрогеоложки параметри (табл. 2).* Коефициентите на филтрация и разпределение (k и K_D) и физичните характеристики (плътност ρ, порестост n и др.) на ХГЕ1, както и k, ρ и n на останалите ХГЕ са определени по данни от полеви и лабораторни изследвания. Според проектната документация k на глинестия пласт под новото депо е 10^{-9} m/s. Миграционните характеристики (коефициент на разпределение K_D, надлъжна дисперсивност α_L, коефициет на дифузия D_M) на ХГЕ и инженерната бариера са изчислени чрез корелационни преходи с цитираните в литературата данни за изграждащите ги литоложки разновидности (Healy, 1990; Spitz and Moreno, 1996; Стоянов, 2003 и др.).
- *Граница между ненаситената и водонаситената зона.* Определена е по данни от сондажните проучвания и електротомографското изследване.
- *Валежна инфилтрация.* За района е установено, че в подповърхностното пространство постъпва около 7% от валежа (548 mm), а скоростта на инфилтрация извън двете депа е в размер на $8{,}4 \times 10^{-5}$ m/d.
- *Повърхностни източници на замърсяване.* В моделите е изследвано поведението на силно и слабо подвижните замърсители по примера на Cl и NH_4. Основните мотиви те да бъдат ползвани като маркери при прогнозните изчисления и за количествените оценки са: (1) Cl са изключително подвижни и очертават максималния обхват на възможното замърсяване; (2) NH_4 се сорбират (задържат) много силно от филтрационната среда и маркират зоните с най-интензивно замърсяване; (3) концентрацията на Cl и NH_4 в сметищните води е висока.
- *Скорост на инфилтрация на сметищните води Wp.* Определена е чрез проиграване на голям брой варианти на шестте модела, включващи вариране на нейните стойности при равни други условия. Моделните решения са устойчиви при Wp не по-висока от $1{,}68 \times 10^{-4}$ m/d. След закриване на депата и изграждане на защитен глинест екран над сметищното тяло, количеството на инфилтрата много рязко намалява, а изтичащите течни емисии под депото са нищожни, т.е. Wp = 0.
- *Концентрации на изследваните замърсители (Cl и NH_4).* Разработването на моделите, количествените оценки и прогнозите са направени като съдържанието на

замърсителите е изразено в относителни концентрации. Прието е, че максималната начална концентрация на Cl и NH_4 в сметищните води (инфилтрата) е 1 или 100 %, а в незамърсената част на моделната област и във валежните води е 0 или 0%. Разпределението на концентрациите на замърсителите в моделните решения е изразено в части от единицата или в проценти.

- *Механизъм на масопренасяне*. Заложен е в пълния му вид: конвективен пренос, съпроводен с обратимо елиминиране (сорбция), механична дисперсия, молекулярна дифузия и разреждане

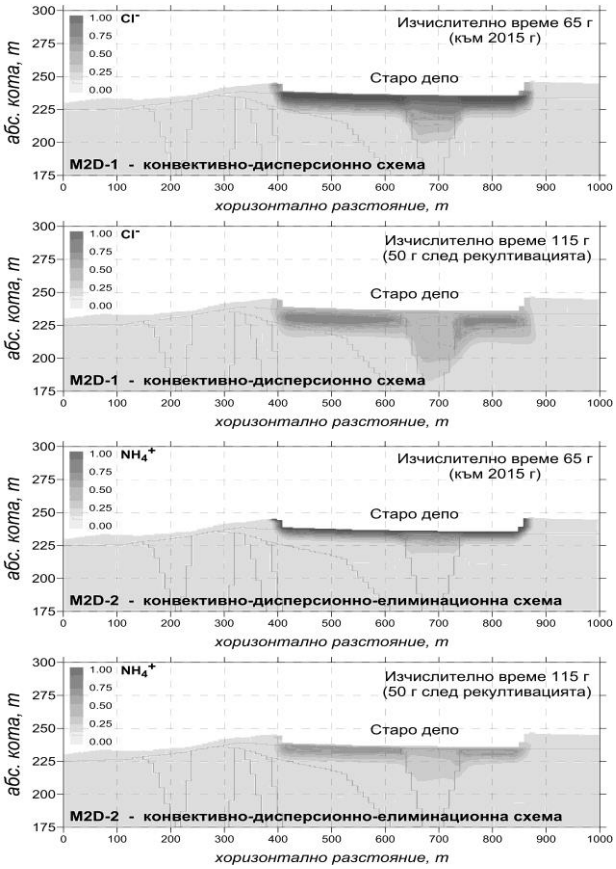
Композиране на хидрогеоложките 2D модели

Математическите модели композирани с програма VS2DTI (Healy, 1990 и др.). Детерминираните ХГЕ в M2D-1 и M2D-2 са симулирани с пет моделни зони (MZ-1, MZ-2, MZ-3, MZ-4 и MZ-5), в M2D-3 и M2D-4 – с три зони (MZ-1, MZ-2 и MZ-3), а в модели M2D-5 и M2D-6 – с четири зони (MZ-1, MZ-2, MZ-3 И MZ-6). Зададените в тези зони характеристики са посочени в таблица 2. Връзката между всмукващия потенциал Ψ, съдържанието на влага ω и коефициента на влагопроводност k' е моделирана с функцията на van Genuchten. В случая, параметрите на функцията (RMC, α и β) са приети по литературни данни за подобен тип геоложка среда. Взаимодействието между течната и твърдата фаза се симулира с линейната изотерма на Henry. Граничните условия са зададени в съответствие с представените в концептуалната схема работни хипотези и дефинираните параметри на валежната инфилтрация и постъпващите под дъното на депата течни емисии. При дискретизацията на моделната област е използвана ортогонална мрежа с размери на клетките 1,0x0,5 m. Продължителността на симулацията в моделите на старото депо е 115 г. (период на експлоатация 55 г. – до 2015г. и период след закриването – 50 г.), а общият период на симулацията в моделите на новото депо е 80 г. (период на експлоатация 30 г. – до 2045 г. и период след закриването – 50 г.). Времето за симулация е разделено на стрес периоди с дължина 1 г.

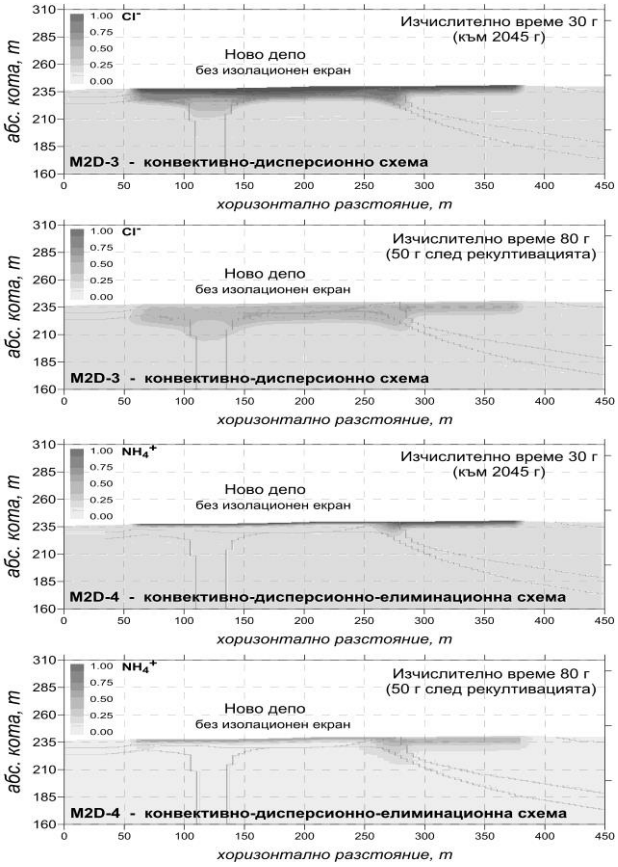
Анализ на резултатите от моделните изследвания

Анализът на резултатите от моделните изследвания, част, от които са илюстрирани на фигури 7, 8 и 9, дава основания да се направят следните обобщения и изводи:

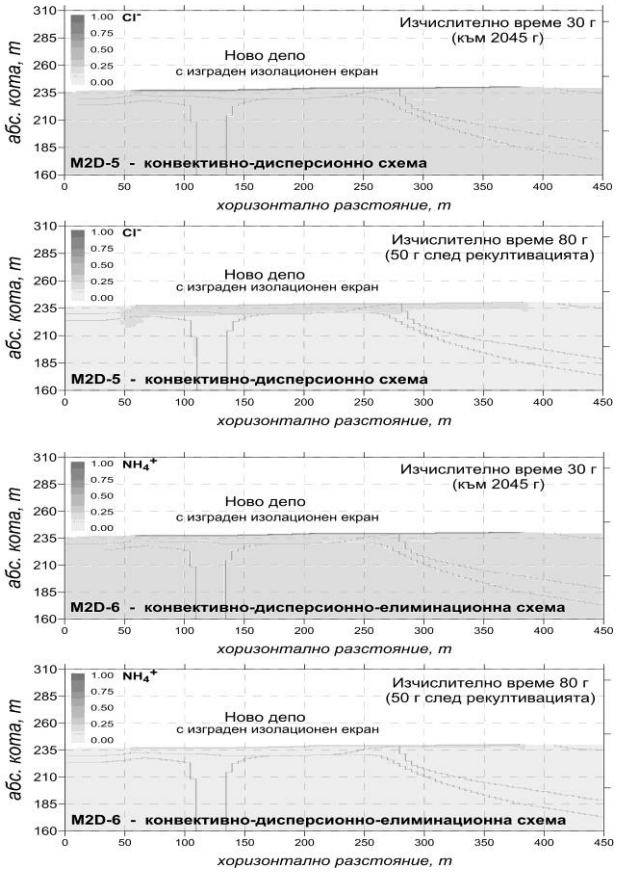
- Количеството на инфилтрационния поток под дъното на двете депа е функция на проницаемостта на геоложката основа и на наличието или отсъствието на инженерни бариери. Основните пътища за миграция на замърсители са ХГЕ1 (глинесто-песъчливият пласт, покриващ скалния комплекс), ХГЕ2 (окарстените мрамори) и ХГЕ4 (напуканите гнайсо-шисти). Голямата дебелина на зоната на аерация (над 20-25 m и повече) е важен фактор за забавяне на миграционните процеси.
- Направените с M2D-1 и M2D-2 симулации показват следните по-важни тенденции в развитието на миграционните процеси в района на старото депо (фиг. 7). Замърсителите от сметищното тяло мигрират до подземните води през малка по размер окарстена зона с широчина 50-70 m в централната част на депото. Отвъд



Фиг. 7. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите в района на старото депо, получени с модели M2D-1 и M2D-2



Фиг. 8. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите в района на новото депо, получени с модели M2D-3 и M2D-4



Фиг. 9. Прогнозни решения за разпространението на замърсителите в района на новото депо, получени с модели M2D-5 и M2D-6

тази зона сметищните води не преминават зоната на аерация. Силно подвижни замърсители (Cl) мигрират в дълбочина с висока скорост, съизмерима със скоростта на инфилтрационния поток. Достигат до подземните води за около 25 г. след началото на експлоатацията. През този период и след закриване на депото, концентрацията на Cl в замърсените подземни води е около 25 %. Слабо подвижните замърсители (NH_4) мигрират много по-бавно, а замърсената с тях зона е много по-ограничена. Първите „порции" NH_4 достигат до подземните води в крайния етап от експлоатацията на старото депо (към 2015 г.). След закриването му ще продължат да навлизат във водонаситената зона, но в много ниски концентрации (около 4-5 %).

- Получените с M2D-3 и M2D-4 прогнозни решения, при неотчитане на инженерните бариери, показват, че геоложката основа на новото депо има добра задържаща способност и е в състояние да забави миграционните процеси (фиг. 8). Силно подвижните замърсители ще достигнат до подземните води около 40-45 г. след началото на математическата симулация, т.е. 10-15 г. след закриване на новото депо. Постъпващите във водоносния хоризонт замърсени води ще съдържат около 7-8 % от замърсителите в сметищния инфилтрат. Слабо подвижните замърсители се движат много бавно и не биха засегнали подземните води. В случая Cl мигрират през две малки окарстени зони с широчина 20-30 m. Извън тези зони замърсяването с Cl под депото ще се ограничи в зоната на аерация до дълбочина 20-25 m. Същевременно, замърсяването с NH_4 ще обхване само най-горната част на разреза до дълбочина от 3 до 9 m.
- Резултатите, получени с M2D-5 и M2D-6 показват, че долният противофилтрационен пласт глина ще ограничи проникването на сметищни води под дъното на новото депо (фиг. 9). За 50 г. замърсяването ще обхване само малка част от зоната на аерация. Силно подвижните замърсители ще достигнат до дълбочина 4-5 m, като концентрацията им в тази зона ще е не повече от 4-5 %. Слабо подвижните замърсители ще се задържат почти изцяло от глинестия защитен екран. Замърсената с тях зона в края на симулацията достига до дълбочина 0,5-1,0 m, а концентрацията им ще е под 2%.

Предвид факта, че долният пласт глина е само един елемент от зададените в проекта на новото депо инженерни бариери, получените с M2D-5 и M2D-6 решения могат да се разглеждат като една по-консервативна прогноза за развитието на миграционните процеси и размерите на замърсяване на земната основа.

Литература

Антонов, Хр., Д. Данчев. Подземни води в НРБ. С., Техника, 1980. - 360 с.

Стоянов, Н. *Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци.* С., Дисертация, МГУ, 2003. - 215 с.

Стоянов, Н. Математически модел на замърсяването на подземните води в района на ДБО Асеновград. – *Сп. "БУЛАКВА", бр. 1*, 2007. - 32-40.

Стоянов, Н. Условия за миграция на несорбируеми замърсители в неводонаситената зона на палеогенските вулканити в района на гр. Хасково. Част 2. Математически модел. *Год. МГУ "Св.Ив.Рилски",, т.53, св I: Геол. и геоф.*, 2010. - 169-174.

Стойнев (ред). *Доклад с резултати от предпроектни (детайлни) геоложки, геофизични, инженерногеоложки, хидрогеоложки и хидроложки проучвания на пл. № 16 Ал. Константиново за регионално ДТБО*. Консорц. „Геокомплекс" ООД. 2007.

Стойнев (ред). *Доклад за проведени инженерно-геоложки и хидрогеоложки проучвания на об.: „Терен за разширение на „Регионална система за управление на отпадъците от регион Пазарджик" по ОП „Околна среда" 2007-2013"*. Геотехника АБС ООД. 2011.

Healy R.W. *Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the U.S. geological survey's computer program VS2D: USGS,* Water-Resources Investigations Report 90-4025, Denver, Colorado, 1990. - 125 p.

Loke, M. H. *A practical guide to RES2DINV ver. 3.4; Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2-D & 3D*. Geotomo Software. Penang, Malaysia. 2001.- 129 p.

Stoyanov, N., St. Dimovski. A simplified approach for modeling of groundwater pollution caused by the sanitary landfill of the city of Plovdiv, Bulgaria. – *Lucrarile stiintifice ale simpozionului international multidisciplinary "Univ. Ropet 2004", Petrosani, Romania*, 2004. - 104-109.

Spitz, K., J. Moreno. *A practical guide to groundwater and solute modeling.* JW&S, Inc., NY, 1996. - 460 p.

Статията е рецензирана от проф. дгн Михаил Гълъбов и е препоръчана за публикуване от кат. "Хидрогеология и инженерна геология.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

KINEMATIC MODELS AND EARLY WARNING SYSTEMS (EARTHQUAKES AND TSUNAMIS) FOR AZERBAIDJAN (BAKU CASE)

Yanko Ivanov, Atanas Kisyov, Boyko Ranguelov

Mining and Geology University, 1700 Sofia, Bulgaria, branguelov@gmail.com

ABSTRACT. The fundamental relationship of the velocities of P- and S-seismic waves is used to calculate the travel times between the well known seismic sources of Azerbaijan to Baku (capital and the most populated city). The time differences between the P and S waves' arrivals are used for signalization and some preventive measures (gas and fuel pipelines switch off, electrical lines disconnection, dangerous production factories stop, etc). It is well known that the seismic waves are tens to thousands faster then the tsunami waves. On the same principle the seismic waves travel times from the tsunmiagenic zones as well as the travel times of tsunamis to Bakuare calculated for practical purposes.

КИНЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА СИСТЕМИ ЗА РАННО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ (ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ И ЦУНАМИ) В АЗЕРБАЙДЖАН (НА ПРИМЕРА НА БАКУ)

Янко Иванов, Атанас Кисьов, Бойко Рангелов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски", 1700 София, branguelov@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Като е използвано фундаменталното свойство, че P вълните се разпространяват 1,71 пъти по бързо от S вълните (които са разрушителни) е изработен кинематичен модел за времената на пристигане на сеизмичните вълни от всички известни земетръсни огнища в Азърбайджан до Баку (столица и най-голям град в страната). Разликите във времената на пристигане на S и P вълните е време достатъчно за сигнализация и предприемане на превантивни мерки – изключване на газопроводи и електропроводи, опасни производства и др. Сеизмичните вълни се движат десетки пъти по бързо от вълните-цунами. Тази разлика в скоростите и тук позволява сеизмичните вълни да служат като сигнализиращи за евентуални (при достатъчни силни земетресения) вълни – цунами. За всички известни цунамигенни огнища са построени времеви диаграми за практическо приложение.

Introduction

Baku is the capital of Azerbaijan and as a large city is threatened by many natural hazards – floods, earthquakes, tsunamis sedimentation fulfillment, water and air pollution, etc. Our research in this paper is focused to the possible negative influence of two natural hazards - earthquakes and tsunamis. Both hazards are wide spread in Azerbaijan since historical times until the present days. Our investigations are related to the possible hypothetical kinematic models of both hazards and possible building of the early warning systems related to these both dangers.There are strong evidences about the influence of these hazards during the historical times. The increased urbanization and the complex combined negative effects of these hazards create our interest to model such EWS. The research is performed in the context of the vulnerability assessment and resilience of Baku (as a most prominent and fast growing city) in Azerbaijan. According to the new seismic zoning maps of Italy, Venice is attributed to the zone of expected PGA between 0.08 and 0.12 g for 475 return period (which is a standard for EU) and macroseismic intensity of VII MSC, with a probability of exceeding 0.1g in 20 years. This suggests expected seismic shaking, which could be dangerous for the historical buildings in Venice. The tsunami danger was assessed as a few centimeters, but during the flooding time these few centimeters could significantly increase the negative effects influencing the flooded areas. The methodology of the hypothetic kinematic models and their application to the early warning systems (seismic and tsunami) is developed and applied to other regions in Europe, specifically Bulgaria and Romania.

Theoretical fundamentals and methodology

The typology of the Early Warning Systems (EWS) could be systemized in two big groups:

- Seismic EWS (SEWS) – working in the time domain of seconds to minutes and
- Tsunami EWS (TEWS) – effective in the time domain of minutes to hours.

The TEWS such as the transoceanic tsunamis required (for example PTEWS and ITEWS – located in the Pacific and Indian oceans) time of warning issue about tens of hours. All known SEWS are based on the fundamental physical property of the seismic wave's propagation: the P-waves, with lower amplitudes and smaller destructive potential, travel approximately 1,71 times faster than the S waves. The P-waves have compression movements of the particles of the solid strata and move to the ray propagation path. These waves are the fastest and have the highest velocity – between

6 and 8 km/s and frequently in the SEWS are called “signaling” waves. The amplitudes of the P-waves are the lowest in the whole phase package of any seismic wave emitted by the seismic source. The S-waves - with several times larger amplitudes and much larger destructive potential due to the medium particles movement perpendicular to the wave ray propagation have lower velocity and are called “destructive” waves. The S-waves also do not propagate trough liquids.The equation:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{2}$$

is the fundamental relationship on which the kinematic SEWS are functioning (Ranguelov and Iliev,2013). This relationship always exists in the solid ideal body and is an immanent property of any ideal elastic medium. Frequently in the earth crust this relationship shows some variations to the lower values due to the not ideal elasticity of the Earth’s strata.

The travel time function F(d, $t_{p,s}$) presents the relationship between the travel times of the different waves phases (S,P,Sg,Pg,Sb,Pb, etc.) and the distance to the seismic source. The function in the coordinate system (d,t) is usually a straight line for the direct waives, depending of the velocity of the seismic waves in the respective layer. The travel time function is the main relationship, which is used to calculate the kinematic models of the time deficit EWS. The main principle of the SEWS requires longer time propagation from the seismic source to the endangered territory, which means longer distance. This time (t_s-t_p) is called “warning time” and presents the time difference between the P and S waves arrival to the threaten object.

The TWES are based on a similar relationship, but in the two strata – water and the solid Earth.

As it was pointed out the seismic waves are propagating with very high velocities – in the range of km/s. The tsunami waves are propagating with much lower velocity – between tens and hundreds of km/h. The time difference between the tsunami and the seismic waves can reach the range of 10^2 to 10^4 of seconds. The case of time deficit in such systems can be conditionally limited to 2-3 hours between the time of occurrence of the earthquake that generated the tsunami and the arrival time of tsunami to any vulnerable object located on the coast. The important peculiarity of the tsunami waves is that they are moving with very low amplitudes in the open sea (not larger then few meters – in the extreme cases) and very low frequencies (long lengths of about tens to hundreds of kilometers) in the open ocean, where they propagate with higher velocity (in the case of Caspian sea - between 80 and 200 km/h). Near to the coast the amplitude of the tsunami wave increased dramatically and can reach tens of meters. In the case of Caspian Sea there are evidences of few meters run-ups. (Dotsenko et al, 2002).The velocity is decreasing, but in any case is over 40 km/h (the highest speed anybody can reach in sprint short distances is always lower).

There is another peculiarity of the tsunami wave propagation and interaction with the bottom bathymetry – this is so called refraction. The refraction means that frequently the tsunami energy can be focused to the selected parts of the coast due to the ray refraction of the wave (Ranguelov, 2014).

There are also some specifics in the wave-coast interaction:

a. smooth bottom and long waves - the increase of the water level is going smoothly like fast tide;
b. deep bottom and short waves - the increase of the wave water front is like wall - so called “bore”;
c. intermediate cases, sometimes accompanied by dispersion - higher frequency, but lower amplitude of the incoming waves.

All described peculiarities suggested that in case of tsunami (especially in the time deficit domain, is possible to observe high waves and low sea level very close in space, sometimes just few kilometers). Such an effect increased the probability of the false alarms. So such cases need compromising approach - economy of time versus more frequent false alarms (Ranguelov, 2011).

In our case of research two hypothetical approaches are performed:

Realseismic kinematic modelfor Azerbaijan (Baku case)

It is based on the assumption that P waves are traveling from each seismic source to the city of Baku for different times. The seismic sources are outlined by the researchers during the construction of the seismic zoning map of Azerbaijan. (Akhundov et al., 2011). The seismotectonic model considered all known seismic events occurred on the territory of Azerbaijan simplified as geometrical polygons.

As it is well known the seismicity of Azerbaijan is wide spread in space and time (Akhundov et al., 2011 and Hasanov et al., 1987) (fig.1).

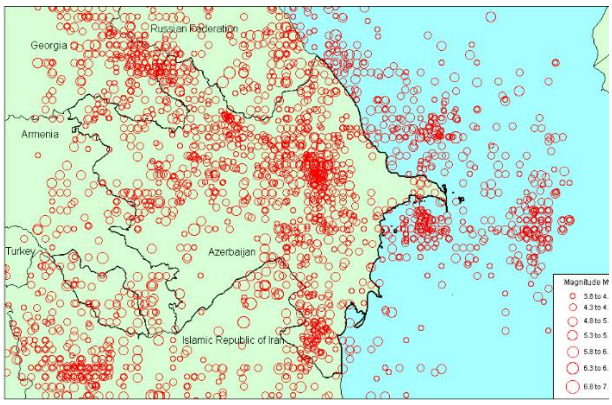


Fig.1. Seismicity of Azerbaijan and surroundings (Akhundovet al., 2011)

We followed the recent seismic zoning mapping by Akhundov et al.(2011), considering all known active faults and established 10 seismic zones. To increase the accuracy of our model (Ranguelov, 2014 andRanguelov, Iliev, 2013) we subdivided the established zones to subzones. After that a standard procedure for calculation of the distances between Baku and each seismic subzone have been modeled (Parushev and Ranguelov, 2014)(fig. 2).

To investigate the expected travel times of the first P wave arrivals (called “signaling” - seismic phase) we use the

calculated model on the base ofthe Jeffrey's-Bullen travel times-tables. (Ranguelov, 2014). The graph is presented on figure3. On the same graph the S-P travel times ("warning time") are plotted. All these data are used to model the kinematic peculiarities of the P, S and S-P waves travel times for each distance between the respective (virtual center) seismic zone and the city of Baku.

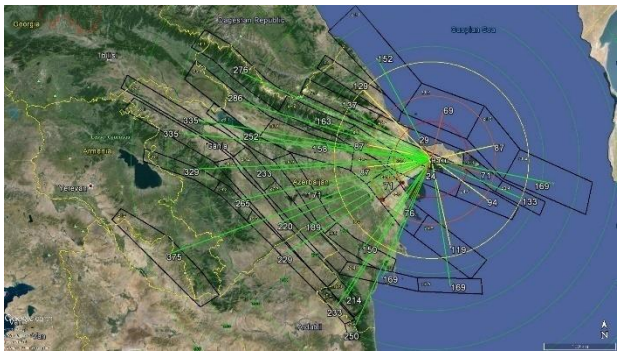


Fig.2. Distances between Baku and the each seismic zone/subzone.Four zones of distances have been outlined: up to 50 km (red), 85 km (orange), 130km (yellow) and over 130 km (green)

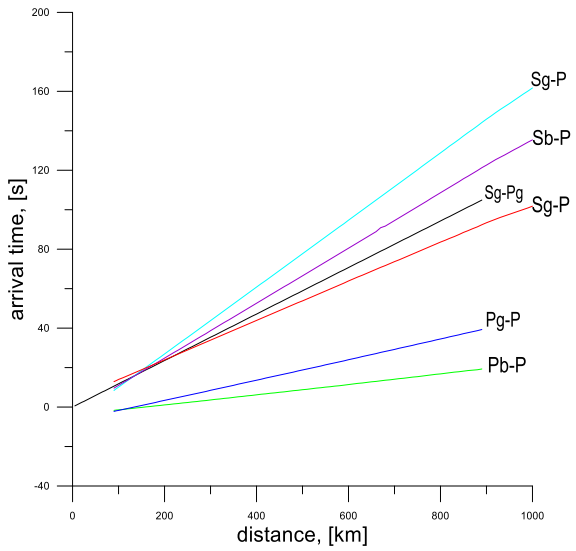


Fig.3. The travel times for the different seismic phases according to Jeffries - Bullen tables

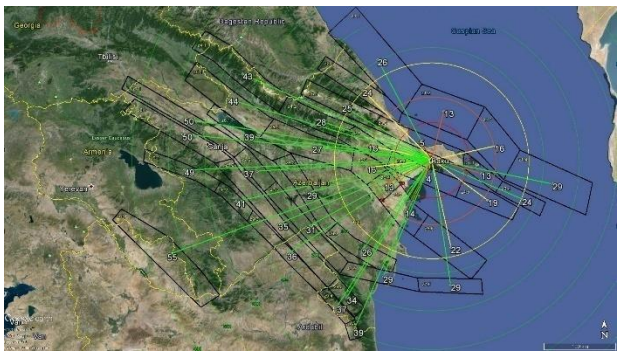


Fig.4. Travel times of the P waves. Four zones according the distances between Baku and each seismic source are outlined – red,orange, yellow and green

Following the explored model (Ranguelov, 2014; Ranguelov et al., 2012) the travel times for the P, S and S-P waves have been modeled (figs.4, 5 and 6).

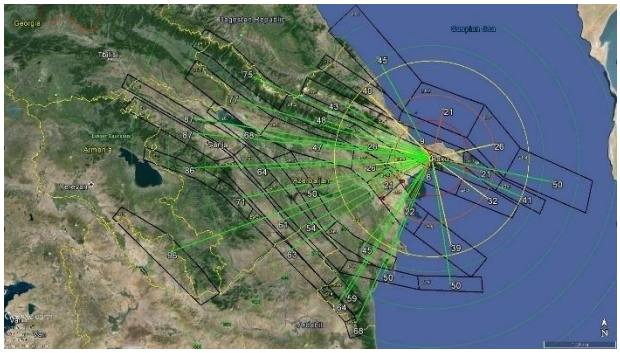


Fig.5. Travel times of the S (destructive) waves. Four zones according the distances between Baku and each seismic source are outlined – red, orange, yellow and green

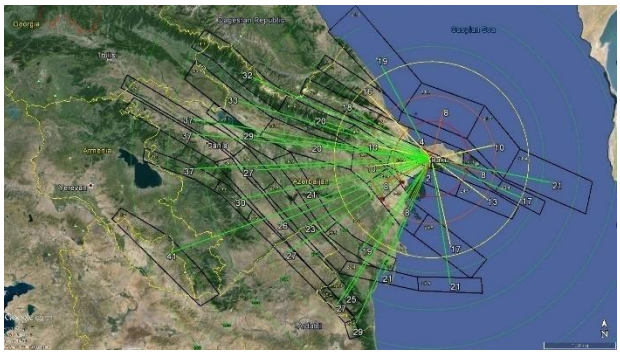


Fig.6. Travel times of the S-P - "warning time". Four zones according the distances between Baku and each seismic source are outlined – red, orange, yellow and green

For easier use of the results in everyday practice the travel times between each zone/subzone and Baku, have been tabulated(Table 1). For each zone/subzone the minimum and the maximum travel time is calculated. Thus the reliability of the modeled travel time can be assessed.

Analysis

The complicated seismogenesis of the Azerbaijan territory suggested complex solutions about a seismic early warning system for Baky city as the biggest and largely populated area. For this study some near filed seismic sources threatening Baku are located at distances less then 50 km. In this case,the earliest signal of the P propagating waves (in the idealized model) can reach the city within 4-5 to 15 seconds. This means thatfor these seismic sources the SEWS appeared as low effective for any evacuation measures. The respective S and S-P travel times are in the range of 10-12 and 4-6 seconds respectively. Based on these results the zone can be considered as "red" - leading to relatively low efficiencyand limited possibilities of fast evacuation, etc.

The P-waves travel times for distances of about 130 km and greater vary starting from 25 seconds (S about 40 and S-P - about 15-20 seconds. These time intervals are relatively longer and give possibilities for effective protective measures (stop the dangerous productions, gas and oil pipelines, electrical and other life-save communications, etc.). That's why this zone, which is larger then 130 km is consideredas "green" . All other cases are in between these values of the travel times of P, S,

and S-P and are outlined as orange and yellow zones -only some particular measures are possible.

Table 1.
Travel times from each seismogenic zone/subzone (their virtual centers) to the city of Baku are tabulated for the different waves' phases. Minimum and maximum times for each zone/subzone are also presented

Zone	Distance [km]		Travel Time [s]					
			P waves		S waves		S-P	
	Min	*Max*		*Min*	*Max*		*Min*	*Max*
1.1	75	226	14	36	22	63	8	27
1.2	42	100	7	20	12	34	5	14
1.3	55	118	10	22	16	38	6	16
1.4	100	220	20	35	34	61	14	26
2	68	196	12	32	20	55	8	23
3.1	92	195	16	32	27	55	11	23
3.2	8	88	1	16	2	26	1	10
3.3	45	98	8	20	13	34	5	14
3.4	97	162	20	27	34	47	14	20
4.1	208	351	34	52	59	91	25	39
4.2	114	212	21	34	36	59	15	25
4.3	54	129	10	24	16	40	6	16
4.4	13	58	2	11	4	18	2	7
4.5	50	133	9	24	15	40	6	16
5.1	218	345	35	51	61	89	26	38
5.2	105	230	20	36	35	63	15	27
5.3	64	110	11	21	18	36	7	15
5.4	54	91	10	16	16	27	6	11
5.5	54	103	10	20	16	34	6	14
5.6	75	165	14	28	22	48	8	20
6.1	189	305	31	46	54	80	23	34
6.2	151	211	26	34	45	59	19	25
6.3	141	171	25	29	43	50	18	21
7.1	250	424	39	61	68	107	29	46
7.2	211	262	34	40	59	70	25	30
7.3	175	226	29	36	51	63	22	27
7.4	157	193	27	32	47	55	20	23
7.5	157	190	27	31	47	54	20	23
8.1	270	415	42	60	73	105	31	45
8.2	198	288	33	44	56	77	23	33
8.3	200	232	33	37	56	64	23	27
9.1	284	384	43	56	76	99	33	43
9.2	248	292	39	44	68	77	29	33
9.3	217	259	35	40	61	70	26	30
9.4	220	246	35	39	61	68	26	29
9.5	235	262	37	40	64	70	27	30
10	333	433	50	63	87	110	37	47

Real tsunami kinematic model for Caspian Sea (Baku case)

The tsunami kinematic models have been investigated before (Ranguelov, 2014; Parushev and Ranguelov, 2014, etc.). The travel times of the tsunami wave's propagation from the respective tsunamigenic source to Baku have been calculated using accepted models (Ranguelov, 2013).

According to the results the travel times are enough for the evacuation measures, thus decreasing the tsunami risk for the city of Baku from the influence of the possible tsunamis generated in the Caspian Sea (excluding some very peculiar cases of the near-field located tsunamigenic zones. On one side, this is acceptable low risk for the population. On the other, the possible additional tsunami influence to the effects of the floods – seasonal or generated by storm surges, underwater landslides (Soltanpour and Rastgoftar, 2011) can dramatically increase their destructive potential. This is way an effective tsunami warning system could be very useful for the Baku resilience to the combination of the tsunami and seismic risks. Similar warning system has been developed and used in the Bulgaria-Romania border region including marine hazards in the sea and on the land (Ranguelov et al., 2011) and developed and assessed for the city of Venice (Parushev and Ranguelov, 2014).

Results and discussion

The tsunamigenic zones at the Caspian Sea, which are the most dangerous for the Baku coast are extracted from Kulikov et al.(2014).The distances and the travel times are modeled following the methodology described in Parushev and Ranguelov (2014) and used for the case of Venice. The results for Baku are presented at figures 7 and 8 and the Table2. The distances varied between 45 km to about to 335 km and the travel times respectively between 30 to about 200 min.

Table 2.
Distances and travel times from tsunamigenic zones in the Caspian Sea to Baku.

Zone	Distance [km]	Travel Time [min]
1	282	154
2.1	236	128
2.2	301	191
3	82	62
4.1	45	33
4.2	75	46
5	202	132
6	334	183

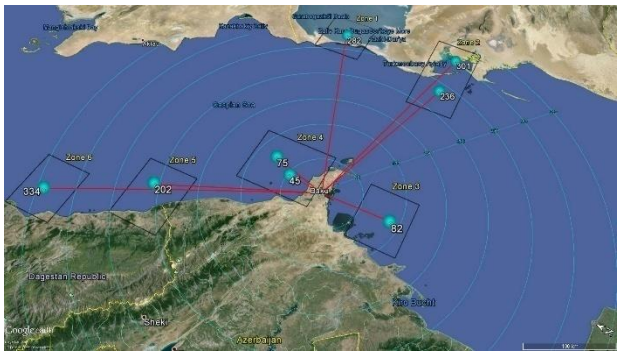


Fig. 7. Distances from the tsunamigenic zones in the Caspian Sea and Baku

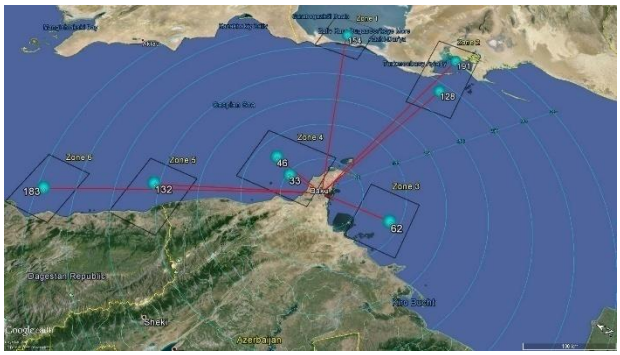


Fig. 8.Travel times for the tsunami waves from the center of each tsunamigenic source to Baku

The travel times of tsunami are calculated by simplified method used in Parushev et al.(2015). The analysis show that the travel times are enough for emergency primitive measures

(signalization to population and administrations in case of nearfiled tsunamigenic source - travel times about 20-30 min) to effective measures (evacuation and stopping the activities of the dangerous production facilities in case of far field tsunamigenic zones -travel times about 2-3 hours).

Algorithms of the kinematic early warning systems (simultaneous models for earthquakes and tsunamis)

The algorithms of the simultaneously acting early warning system (both seismic and tsunami) are developed on the kinematics of the seismic (respectivelytsunami) waves. They are using the basics described in the fundamentals section and consider the different velocities of the P and S waves (for the SEWS) and seismic and tsunami waves (in case of the TEWS) (Ranguelov et al., 2006)

The installation of the hardware needs to follow some general considerations:

1. Selection of the locations according the seismic sources geography;
2. Travel times curves for the transformation of the distances to the time domain.
3. Use of the P-waves times for the signalization of the event and triggering the whole system;
4. Seismic station optimization according the seismic sources locations and common use (in some cases) of the same equipment (if possible);
5. The trigger stations located to the nearest point of any epicenter;
6. Use of some stations locations of the equidistant travel times to the seismic sources;
7. Peripheral stations for detection of the strong seismic motions with sources outside the network geometry.

The general steps follow the philosophy that it is essential to have a signal for the hazardous event (earthquake or generated tsunami) as soon as possible after its generation (Ranguelov, 2010). As the seismic P and Swaves velocities are in the range of km/s, it is essential to have a seismic sensor as close as possible to the nearest point of the epicenter. The same is valid when tsunami wave is generated by the seismic (or other type tsunamigenic event – landslide, turbidities, volcanic ash slump, etc.). When the threshold is considered for the dangerous event, if the registered level is higher, then the whole algorithm is triggered. Then the following steps are necessary:

1. P-wave'ssignal detection that the event is generated and the waves are propagated. (Usually such signal triggers the entire network);
2. Modeling of the wave's propagation direction, following the consecutive triggered seismic devices;
3. Selection of the precomputed scenario (this is valid for the tsunamigenic sources, because of their variety in magnitude, location, bottom and costal geometry and other influencing the tsunami propagation parameters) (Ranguelov, 2010). The selection is closely related to the so called"decision matrix";
4. Modeling of the time of incoming S-waves (for the SEWS) and the time delay of the S-waves, following the P waves. Zonation to near distance, middle distance and long distance and introduction of the "red", "orange", "yellow", and "green" signaled zones (Ranguelov et al., 2011);
5. The same for the tsunami waves. The confirmation of the tsunami waves generated by the disturbing event (earthquake, slump, fast subsidence, etc.) usually is performed by the bottom located devices (micro-barographs, sea-level measuring devices, OBS, DART, etc.) as effective hardware (Ranguelov et al., 2011);
6. Decision for the warning issue - the decision matrix development(Ranguelov, 2014);
7. Warning issue to the clients - population, civil defense authorities, decision makers, administrations, etc. (Ranguelov., 2014);
8. The combined warning issue in case of simultaneous action of earthquakes, landslides, turbidities (or other generating events) and tsunamis;
9. Different ways to communicatethe warning - sound or light signals, messages, TV and radio emissions, social networks etc. (Parusehv et al, 2015);
10. Cancelation of the warning after the event passed.

To perform these algorithms a lot of specific actions must be done (Ranguelov et al., 2011). The most important one is the hardware (devices) installation as close as possible to the seismic (tsunami) source. This could be a specialized seismic strong motion device, or the nearest seismic station of the national seismological network.

Suggestions for the early warring systems - tsunamis and earthquakes (Baku case)

Considering the results obtained by the investigations of the kinematic models - both for the earthquakes and tsunamis the following possible directions of EWS development could be suggested (Ranguelov, 2014):

- To create the new established seismic early warning system with sensors located in each seismic source.The specific devices have to be connected in a specialized SEWS. This creates independent approach to the SEWS use, but a unification of all devices in the SEWS and TEWS is essential;
- The creation of a TEWS is necessary due to the possibility of a coincidence in time of the high water level (for example seasonal flooding or storm surge, etc.) and the tsunami generation in a far field source. In such a moment the small additional water level increase can generate much more destruction due to the nonlinear effects observed in similar situations;
- The TEWS needs a specialized approach for the assessment of the locations and the equipment of it. The previous investigation show that each site needs rather specific equipment, based on the specialized investigations (Ranguelov, 2011), and considering the local conditions. In any case, the complex bottom stations are an obligatory element of such systems (Ranguelov, 2014 and Ranguelov, 2013);
- The construction of a specific decision matrix, specialized protocols of announcements and other elements providing the warning issue to the authorities and population is another direction which must be developed for any EWS.

Conclusions

The kinematic modes about seismic and tsunami early warning systems are developed using the standard methodology of the travel times for seismic S and P waves as well as for the tsunamis travel times.

The models covered all seismic active zones in Azerbaijan. They have been divided into several main groups -red, orange, yellow and green seismic zones. For allof them, the travel times of the P, S, and S-P seismic waves to the city of Baku are calculated. These calculations can be used by the local authorities, decision makers and other responsible institutions (like Civil Defense, administrations, etc.) for the development of a SEWS providing resilience of Baku infrastructure and population in case of strong earthquake occurring anywhere in Azerbaijan.

The models of the travel times of tsunamis propagating trough the Caspian Sea and the calculations of them show relatively high effectiveness of the TEWS regarding Baku city and the oil and gas productive systems and low coasts.

Some practical considerations are presented about the organization of a SEWS and TEWS in the region of Baku, using the existing seismic network of Azerbaijan or creation the own infrastructure of these early warning systems.

References

Akhundov, A., T.Mammadli,E.Garaveliyev,Q. Yethirmishli,, G.Tanircan,.*Seismic Hazard Assessment for Azerbaijan*., The NATO science for peace and security program. EGU2011-2738, 2011.– 1–22.

Dotsenko, S.F., I.P. Kuzin,. B.V. Levin, O.N. Solovieva. *Tsunamis in the Caspian Sea: historical events, regional seismicity and numerical modeling*. Proc. PETRO-PAVLOVSK-KAMCHATSKY TSUNAMI WORKSHOP, 2002. – 23–31.

Hasanov, A.G., E.A. Rogojin, L.B. Slavina, T.Y. Mammadov.Tectonic control on minor seismicity of the eastern part of Great Caucasus. - *Publication of Academy of Sciences of Azerbaijan SSR*, series Earth science, Baku, 1987. – 20–26.

Kulikov, A., I.P. Kuzin, O.I. Yakovenko. Tsunamis in the Central Part of the Caspian Sea*, Oceanology, Vol. 54, No. 4*, 2014. – 435–444.

Parushev, I., B. Ranguelov, T. Iliev, E. Spasov. Kinematic modelling of idealized system for early registration and warning in case of an earthquake. - *Proc. 7th BgGS National Conference With International Participation "GEOPHYSICS 2015*", 2015. - 1314-2518

Parushev, I., B. Ranguelov.General principles of the kinematic models used in early warning systems – earthquakes and tsunamis (venice case). - *Ann. of M&G University, Vol. 57, Part I, Geology and Geophysics*., 2014. - 95-100

Ranguelov, B. Atlas of the tsunami risk susceptible areas along the Northern Bulgarian Black Sea coast – Balchik site, 2010. - 25 p.

Ranguelov, B. *Natural hazards – nonlinearities and assessment.* S., Acad. Publ. House (BAS), 2011. - 327p.

Ranguelov, B. Complex geophysical investigations – natural hazards, monitoring and early warning systems, on land and in the black sea. - *Proc. of the 4th Int. scientific and technical conference "Geology and hydrocarbon potential of the Balkan-Black Sea region", Varna, Bulgaria*. 2014. - 341-347.

Ranguelov, B. Early warnings - Bulgarian experience in case of time deficit systems (earthquakes and tsunamis). - *Proceeding 1/2, 5th ICC&GIS*, 2014. - 738-745.

Ranguelov, B., A. Georgiev,E.Spassov.Natural hazards and early warning systems. - *Ann. M&G University, vol. 49, part I, Geology and Geophysics,* 2006.

Ranguelov, B., R. Radichev, S. Dimovsky, G. Oaie, R. Dimitriu, M. Diaconescu, A. Palazov, O. Dimitrov, S. Shanov, N. Dobrev. MARINEGEOHAZARDS Project – key core elements of the early warning system in the Black Sea. - *Ann. of M&G University, Vol. 54, Part I, Geology and Geophysics*, 2011. - 209-211.

Ranguelov, B., G.Mardirossian, N. Marinova,E. Spassov.Early warning systems – EWS (earthquakes and tsunamis) and their effectiveness. - *Seventh scientific conference, "SES2011", 29th, Sofia, Bulgaria,* 2012. - 307-312.

Ranguelov, B., T. Iliev. A kinematical model of the Seismic Early Warning System (SEWS). - *Proc. 7th Balkan Geophysical Congress, Tirana,* 2013**.**

Soltanpour, M., E. Rastgoftar. Study of tsunami attacks on neighboring countries of caspian sea caused by a probable submarine landslide. - *Journal of Coastal Res. ICS2011 (Proceedings) Special Issue 64*, 2011. - (5 pp)

The article is reviewed by Prof. Dr. Ivanka Paskaleva and recommended for publication by the Department „Applied Geophysics".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ОСНОВНИ ДЕЙНОСТИ ПРИЛАГАНИ В ПРОЦЕСА ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ НА ОБРАЗИ ПРИ РЕШАВАНЕ НА ПРОГНОЗНИ ГЕОЛОЖКИ ЗАДАЧИ

Атанас Кисьов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700София, e-mail: at.kisyov@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Теорията за разпознаване на образи в геологията и по-конкретно за класифициране на обекти по съвкупност от различни признаци (геофизични, геоложки, геохимични и др.) интензивно се развива и намира все по-широка практическа реализация. Разпознаването на образи е машинно-ориентирана методология, позволяваща бърз и многократен анализ на разнообразна информация и осигуряваща получаване на количествени резултати. Приложението на методите използвани за разпознаване на образи в геоложкото прогнозиране изисква прилагането на последователност от някои основни дейности, свързани с подбора на територията и обекта на прогнозиране, събирането и класифицирането на признаци използвани за описание на прогнозните обекти, както и формиране на еталонни обекти, които да бъдат използвани в процеса на класификация

MAIN ACTIVITIES APPLIED IN THE PROCESS OF PATTERN RECOGNITION USED FOR SOLVING PROGNOSTICATION GEOLOGICAL TASKS

Atanas Kisyov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: at.kisyov@gmail.com

ABSTRACT. The theory of pattern recognition in geology and in particular for classification of objects in a set of different characteristics (geophysical, geological, geochemical, etc.) is developing intensively and is having a wide-ranging practical implementation. The pattern recognition is a machine-oriented methodology providing a rapid and repetitive analysis of diverse information and ensuring acquirement of quantitative results. The application of pattern recognition in geological prognostication requires a sequence of some major activities related to the selection of the territory and the subject of estimation, to the collection and classification of the characteristics used for description of the studied sites and to the definition of reference sites that can be used in the classification process.

Въведение

Решаването на всички прогнозни задачи винаги, в една или друга степен, е свързано с елемент на неопределеност. Например, традиционната концепция за металогенно прогнозиране се основава на представата, че при отчитане само на няколко основни геоложки фактора най-ефективно може да се реши задачата, независимо от обстоятелството, че практически всички геоложки и геофизични данни по своята природа имат статистически характер. Освен това, функционалните връзки между геоложките и геофизичните параметри и орудяванията са сложни и многовариантни. Ето защо все по-убедително се налага идеята за насочване на стратегията на прогнозирането към комплексното обработване и анализиране на цялата налична информация за изследваните площи и последващо приложение на методите за разпознаване на образите.

По-голямата част от методите за разпознаване на образи се основават на принципа на пряката аналогия. Това е традиционен подход и при геопрогнозните задачи. Като правило, при тях се сравняват изследваните по комплекс от геолого-геофизични признаци участъци с известни еталонни промишлени находища или неперспективни участъци.

Методична схема на прогнозната задача

Приложението на методите за разпознаване на образи в геоложкото прогнозиране изисква осъществяването на следните основни дейности:

Избор на територията и обекта на прогнозиране

Металогенното прогнозиране се осъществява за територията на съответните рудоносни региони, структурно-металогенни зони или провинции, рудни райони, рудни полета и рудни находища. Обектът на прогнозиране притежава специфичен набор от търсещи признаци.

Избор на подход при прогнозирането

Възможни са два подхода към геоложките условия от позицията на прогнозирането със средствата за разпознаване на образи - площно и обектно прогнозиране. (Дуда и Харт, 1976; Duda and Hart, 2000).

Площното прогнозиране предвижда разделянето на изучаваната територия на равни по площ участъци (елементарни участъци), всеки, от които, с комплекс от признаци, се сравнява с еталонни участъци.

Обектното прогнозиране се състои в оценка перспективността на отделни геоложки обекти или геоложки

структури. За целта те се съпоставят с аналогични еталонни обекти (например, в границите, на които има находища на полезни изкопаеми или с детайлни работи е доказано тяхното отсъствие).

Изборът на конкретен подход зависи от целите на прогнозирането, от степента на изученост на територията и от естеството на първичните материали.

При голямата детайлност на геолого-геофизичните работи и необходимост да се оцени конкретната перспективност на отделни обекти (структури, интрузиви, разломи, рудни полета и др.) е целесъобразно приложението на обектния подход при прогнозирането.

Площният подход е подходящ главно при регионалното и полурегионалното прогнозиране върху площи, които включват различни структури.

Определяне на елементарния участък на прогнозиране

Ако бъде приет площният подход за прогнозиране от изключително важно значение е коректният избор на елементарни участъци. За такива обикновено се приемат клетки с еднакъв размер и еднаква форма, съвкупността от които обхваща цялата изследвана територия. Размерът на елементарните участъци зависи главно от мащаба на прогнозните проучвания.

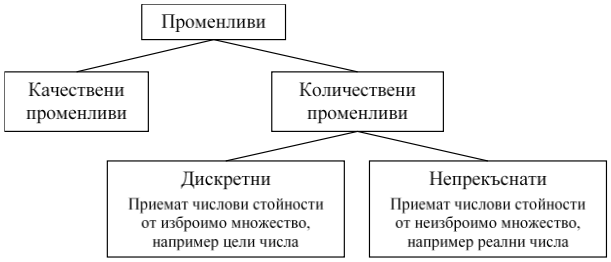
Набиране на изходна съвкупност от признаци за описание на прогнозните обекти

Един от най-сложните и важни етапи на количественото металогенно прогнозиране е набирането на изходния комплекс от признаци, които се използват за описание и съпоставяне на елементарните участъци. Това е неформализуем процес, при който са решаващи опитът и знанията на специалиста. Съществуват обаче някои съображения, които трябва да се отчитат. Съгласно с принципите на статистическата обработка и анализа, геоложките параметри могат да се разглеждат като признаци, ако е възможно еднозначно да бъдат описани за всички елементарни участъци (Silverman, 1986; Scott, 1997).

Данните за прогнозирането се вземат от първичните геоложки материали – геоложки, геофизични, геохимични, топографски и други карти, както и от продукти на тяхната обработка. Видът на тези данни, които в терминологията на автоматизираното прогнозиране се наричат признаци, е извънредно разнообразен.

Данните се вземат чрез измерване на определена характеристика върху група от обекти. Когато измерванията на тази характеристика могат да приемат различни числови или нечислови стойности, тази характеристика се нарича променлива. От друга страна, ако характеристиката е една и съща за всеки елемент на групата, то тя е константа. Константите не подлежат на статистически анализ.

Променливите могат да бъдат класифицирани по различни начини. Класификацията на променливите според техния тип е илюстрирана на фигура 1.



Фиг. 1. Класификацията на променливите според техния тип

Основното разграничение на променливите е на *количествени* (наричани още *числови* или *вариационни*) и *качествени* (наричани още *категорийни* или *атрибутивни*).

Количествени променливи са тези, чиито стойности се изразяват с числа в съответна мярка. Количествените променливи се поделят на *непрекъснати* (наричани още *индискретни* или *неизброими*) и *дискретни* (наричани още *прекъснати* или *изброими*).

Числова променлива, чийто допустими стойности са неизброими се нарича *непрекъсната променлива* (*continuous variable*). Случайната величина X е непрекъсната ако може да приема всички възможни стойности в даден краен или безкраен интервал. Вероятността за приемане на всяка допустима стойност x е нула (P(X=x)=0 за всяко x). За една непрекъсната случайна величина комулативната функция на разпределение е непрекъсната (без скок). Непрекъснатата променлива може да приема всяка една стойност върху скалата на измерване. Следователно, често казвайки, че дадена променлива е непрекъсната ще имаме предвид не толкова конкретния резултат от измерването, а по-скоро модела, който използваме при анализа и интерпретацията на тази променлива. В този случай ще предполагаме, че няма прекъсвания между отделните стойности на измерителната скала. На практика не може да се измери непрекъсната променлива с безкрайна точност и затова тя се апроксимира с изброима, дискретна променлива (Ту и Гонсалес, 1978).

Числова променлива, чийто допустими стойности са изброим брой се нарича *дискретна променлива* (*discrete variable*). Типичен пример са променливите, чийто стойности са подмножество на *целите числа* (*integer*). Случайната величина X е дискретна, ако с определена вероятност може да приема отделни, изолирани възможни стойности. Дискретната променлива може да приема стойности само от едно изброимо (крайно или безкрайно) множество.

Качествени променливи са тези, чиито стойности нямат числов израз, а се дават описателно, словесно. Такива са например петрографска разновидност и др.

Особен вид качествени променливи са тези, които имат само две възможни стойности, представляващи проста алтернатива. Такъв е например случаят, когато дадена единица или има ("да"), или няма („не") дадено качество или свойство. Такива променливи се наричат *дихотомни* или *алтернативни* (Byholt and Hjort, 1996).

Следва да се отбележи, че методите за анализ на данните са тясно обвързани с начина на измерване. При анализа на данните на преден план излизат знанията ни за стойностите на свойствата на обектите. Тези стойности се получават чрез измерване на нужното свойство на обекта. Под измерване ще разбираме присвояването на определени символи на изучаваното свойство в съответствие с предварително зададено правило. Тези символи могат да бъдат букви, цифри или числа в зависимост от скалата на измерване, която се определя от типа на променливата – количествена или качествена.

Обсъждането на скалите на измерване е твърде важно, когато се предвижда използване на статистически методи за анализ. Скалата, по която се измерва дадена променлива е фактор от голямо значение за определянето на подходящи методи за анализ на данните във всяко едно изследване. Разделянето на скалите за измерване се извършва в съответствие със степента на точност на измерването, или с други думи, в съответствие с количеството информация, което те носят (Myashita et al.,1993; Devroye et al., 1996).

Измерванията могат да бъдат класифицирани в съответствие с *типа* или *йерархията* на мерната скала. Съществуват четири типа скали за измерване като всяка следваща е по-точна и по-информативна от предходната в йерархията. *Качествените* променливи се измерват в *номинална* и/или *рангова* скала, а *количествените* – в *интервална* и/или *скала на отношенията*. Първите две скали се наричат *неметрични*, а вторите две – *метрични* (респ. има неметрични и метрични данни).

За типовете скали може да бъде обобщено както следва:
- номиналната скала класифицира без да задава наредба;
- ранговата скала класифицира като задава и линейна наредба;
- интервалната скала класифицира като и задава линейна наредба, но допълнително задава относителна единица на измерването и относително начало на измерването;
- скалата на отношенията класифицира като задава и линейна наредба, освен това има зададена единица на измерването и абсолютно начало на това измерване.

Описание на всички елементарни участъци по набора от изходни признаци

Автоматизираният процес на обработка и анализ на информацията изисква нейното провеждане във форма удобна за математическа обработка. Това най-често е числовата форма на данните. За нейното постигане данните предварително се кодират. Кодовете трябва да удовлетворяват и изискванията за стандартизиране на данните – еднозначност, кратност, адитивност, прогресивност и др.

Съществено методично значение има начинът на представяне на признаците при описание на елементарните участъци. За количествените признаци (например разпределението на потенциалните геофизични полета) се фиксира стойността на параметъра за всеки от елементарните участъци. При качествените признаци обаче (например наличие на определена геоложка формация) фактологичното описание съвпада с алтернативна констатация, т.е. възможно е само едно от две взаимоизключващи се стойности (1 или 0, т.е. "да" или "не"). Този вид признаци, именувани най-често картографически, е целесъобразно да бъдат обработени по подходящ начин, за да се получи стойностно описание и да се създадат предпоставки за по-пълно извличане на полезната информация (Ruiz and Lopez-de-Teruel, 2001; Pao, 1990).

Признаците се описват количествено чрез кодиране на изходните променливи в определен брой интервали - *градации на признаците.* Броят и границите на градациите се подбират конкретно за всеки признак така, че възможно най-пълно и достоверно да описват статистическото му разпределение. При това се търси оптимален компромис между две противоречиви тенденции:
- по възможност да се локализират областите с екстремални стойности на променливата;
- да се постигнат условия, при които плътността на разпределение на обособените градации да не благоприятства за забавяне на малък брой стойности на променливата, информативността на които може да се определи достоверно надеждно(Ту и Гонсалес, 1978).

Формиране на съвкупности от еталонни обекти

Формираното признаково пространство (масивът от описанията на елементарните участъци) в общия случай се разбива на три области: еталони от перспективни (рудни) участъци, еталони от неперспективни (безрудни) участъци и участъци, на които трябва да се оцени перспективността.

Подходът към решаването на задачата за избор на еталони от двата класификационни класа - рудни (положителни) и безрудни (отрицателни), има голямо значение. Това е много важен методичен въпрос на обработката, от който зависи оптималното използване на априорната информация. Специално внимание заслужават два аспекта на този въпрос - пространственото разположение на еталоните и формирането на съвкупност от еталони за представяне на клас безрудни. Вероятностно-статистическите схеми, които могат да се използват за разпознаване, изискват съвпадение на многомерните разпределения за еталоните и разпознаваните обекти в пространството на диагностиращите признаци. Това изискване се изпълнява удовлетворително, ако еталонните и разпознаваните обекти са разположени достатъчно равномерно в изследваната територия.

Докато въпросът за избор на еталони от първи клас - рудни, се решава еднозначно, съвкупността от обекти от втори клас - безрудни, винаги се формира в значителна степен условно. Възможни са два вариантни подхода. При първия еталоните от втори клас се набират от добре изучени участъци, на които не е установена промишлена минерализация. При втория се анализира разпределението на признаците за цялата територия, в която няма промишлени орудявания. При първия вариант много трудно се изпълнява условието за равнозначно и равномерно отделяне на отрицателните еталони върху изследваната територия. Вторият вариант се основава на

предпоставката, че зад границите на известните промишлени минерализации орудяванията се срещат твърде рядко, което не винаги е валидно за цялата територия.

Избор на метод за разпознаване на образи

Разпознаването на образите е научна област, изучаваща функционирането на системи, които извличат общите характеристики на съвкупност от обекти, както и методите за създаване на такива системи. (Duda etal., 2000; Devroyeetal., 1996). За решението на проблема за разпознаване на образи (*pattern recognition*) се използват широк кръг от методи за извличане на знания (*knowledge discovery*) в големи бази данни (*data mining*).

Опитът показва, че могат да се обособят две постановки в процеса на разпознаването:

- Първата предвижда създаването на поне две обучаващи извадки на базата на еталонни обекти. Предполага се, че еталонните обекти, обединени във всяка от групите, са проявление на аналогични геоложки фактори и различията им имат случаен и незакономерен характер. Обединяването на разнородни обекти не позволява да се получи удовлетворително, както във формално, така и в геоложко отношение, прогнозно решение. Затова в райони, в които се наблюдава голямо разнообразие на геоложките условия се допуска по-голям брой обучаващи извадки. Присъствието на обучаващи групи от елементарни обекти в процедурата по разпознаването отделя клас задачи, означавани като „*разпознаване на образи с обучение*“.
- Втората постановка предвижда използването на така наречена *автоматична класификация* (*разпознаване без обучение*). Прилага се в слабо изучени територии, където е затруднено комплектоването на еталонни групи обекти.

При използването на алгоритми за разпознаване на образи се изхожда от свойството на признаковото пространство. Приема се, че постановката на задачата за разпознаване е детерминистична, когато пространството на признаците може да се раздели на непресичащи се обекти всеки, от които дефинира един от класовете. Ако съществува смесване на класовете в пространството на признаците, тяхното разделение е осъществимо на основата на статистическите постановки за решение на задачите за разпознаване на образи. Този подход към свойствата на признаковото пространство разделя алгоритмите за разпознаване на образи на две групи: детерминистични и статистически (Kohonen, 1986; Mulleretal., 2001).

Използват се и други класификации за разделяне на алгоритмите. Съществува алтернативна група алгоритми, при която е съществена информацията, описваща структурата на всеки обект. При тях от процедурата за разпознаване се изисква не само да отнесе обекта към определен клас, но и да се опишат тези негови страни, които изключват отнасянето му към друг клас. Такъв подход се нарича „синтактичен“ (структурен).

Приложението на статистическите решения е свързана с по-големи трудности, отколкото на детерминистичния подход. При статистическите алгоритми трябва да се отчита независимостта на признаците и закона на разпределението им, обемът на обучаващите извадки и т.н. Статистическиятанализ, обаче, преодолява пречещото действие на многото случайни фактори, които маскират характерните различия между класовете и затрудняват тяхното разделяне.

В сравнение с вероятностния, детерминистичният подход е по-слабо разработен, но въпреки това има широка област на приложение. Той е освободен от редица ограничения и изисквания, предявявани към изходните данни. Детерминистичните (евристични) алгоритми имат за цел намирането на най-кратките пътища към решаването на прогнозните задачи (Rumelhart and McClelland,1986).

Приема се, че ефективността на разпознаването на образи зависи от особеностите при използването на разрешаващата схема в дадена задача, а не от индивидуалните особености на алгоритмите, осъществяващи конкретната схема на разпознаването. При еднакви други условия, най-подходящи са тези алгоритми, които разделят класовете с помощта на най-прости решаващи правила. Поради това, при решението на дадена прогнозна задача изследователят е заинтересован да разполага с набор разнообразни алгоритми. Впоследствие се избира като работен този алгоритъм, който при конкретните условия е най-ефективен и дава най-просто и надеждно решение.

Разпознаване и класификация

Същинското разпознаване се състои в построяване на формален търсещо-оценъчен критерий въз основа на избрания алгоритъм за разпознаване на образи. Преди да послужи за прогнозиране, решаващото правило се подлага на съдържателен анализ. Най-често оценката на качествата на решаващото правило се извършва по резултатите от класифицирането на контролни обекти, които не са използвани в операцията по обучението. Специалистите анализират резултатите от контролните решения, отчитайки броят на грешките и отказите за класификация, в непосредствена връзка с геоложкия смисъл на разделението на обектите. При необходимост решаващото правило се коригира. За целта може да се преформулира признаковото пространство, да се промени състава на обучаващите извадки, или да се смени избраният алгоритъм. Тези процеси се повтарят, докато се получат удовлетворителни резултати. Въз основа на уточненото решаващо правило се извършва класификацията, т.е. автоматичното разделяне на изследваните територии или обекти на класове с геоложко съдържание (Orr, 1996; Haykin,1998;).

Оценка на надеждността на решенията

Използването на тестова група обекти с известна принадлежност е най-често прилаганият метод за оценка на надеждността на разпознаването. Такъв подход е оправдан при достатъчно големи представителни групи от обекти с известна геоложка принадлежност. В противен случай се използва методът на изключването от обучаващото множество на единични обекти и разглеждането им в последствие като контролни. Процедурата се повтаря за всички обекти включени в

обучението. При статистическите методи, качеството на решаващото правило се оценява по класификационната грешка, която има вероятностен характер.

Заключение

Приложението на методите за разпознаване на образи, се налага като един съвременен подход към анализа и извличането на закономерности при обработката на масиви геоложки и геофизични данни и приложението им за прогнозиране на находища на полезни изкопаеми.

В тази връзка, чрез приложението на методамогат да се решат следните задачи:

• Разработването на методи за откриване и интерпретация на закономерности в масиви данни;

• Създаването на формален език за построяване на модели, описващи закономерностите в данните и приложението му за предсказване и търсене в бази данни;

• Създаването на методи за прогнозиране на рудни находища, при наложени моделни ограничения;

Литература

Дуда, Р., П. Харт. *Распознавание образов и анализ сцен. М., Мир.* 1976. – 509с.

Ту, Дж., Р. Гонсалес. *Принципы распознавания образов. М., Мир.* 1978. – 412с.

Byholt, M., N.L. Hjort. Sometimes nonparametric beat parametric even when the model is right. - *Statistical Research Report, Dep. Of Mathematics, University of Oslo,* No. 18, 1996. -1-20.

Devroye, L., L. Gyorfi, G. Lugosi. A probabilisticTheory of Pattern Recognition*, Springer.* 1996. - 654p.

Duda, R., P. Hart, D. Stork. *Pattern Classification, 2nd ed., John Wiley & Sons.* 2000. - 680p.

Haykin, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice Hall.* 1998. - 842p.

Kohonen, T. Learning Vector Quantization, Helsinki University of Technology*, - Lab of Comp. and Information Science, Report TKK-F-A-601. 1986. - 220-227.*

Muller, K.R., S. Mika, G. Ratch, K. Tsuda, B. Scholkopf. *AnIntroduction to Kernel Based Learning Algorithms, IEEE Transaction on Neural Networks, vol.12, No.2, March,* 2001. - 181-198.

Myashita, Y., Z. Li, S. Sasaki. Chemical Pattern Recognition and multivariate analisys for QSAR studies. - *Trends in Analitycal Chemistry, vol. 12, no.2.* 1993. - 55-63.

Orr, M.J.L. *Introduction to radial basis networks.TR Centre for Cognitive Science, Univ. Of Edinburgh, Scotland, 1996. http://anc.ed.ac.uk/~mjo/.*

Pao, Y. H. *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks, Addison-Wesley Publishing, Reading, Massachusetts.* 1990. - 599p.

Ruiz, A., P.E. Lopez-de-Teruel. Nonlinear Kernel-Based Statistical Pattern Analisys*. - IEEE Transaction on Neural Networks, vol.12, No.1,* 2001 .- 16-32.

Rumelhart, D.E., J.E. McClelland. Parallel Distributed Processing. - *MIT Press, Cambridge, Massachusetts.* 1986. - 1024-1077.

Scott, D.W., *Density Estimation, Rice University, Houston, TX.* 1993 - 335-339. (http://rice.edu)

Silverman, B. W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall.1986. – 22p.

Статията е рецензирана от гл. ас. д-р Мая Григорова и е препоръчана за публикуване от кат. “Приложна геофизика”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geologyandgeophysics, 2016

GEOPHYSICAL APPROACH FOR MONITORING SALTWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS

Yanko Ivanov, Atanas Kisyov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Bulgaria; ianko@mail.bg, at.kisyov@gmail.com

ABSTRACT. In many places around the world groundwater is used as a main source of fresh water. The alarming rate of increasing the world's population makes its monitoring and managing of great importance. Both anthropogenic activities and natural phenomena lead to displacement of fresh groundwater by saline water. Electrical Resistivity Tomography (ERT) performed with various electrode configurations is widely used geophysical technique for high resolution illustrations of sites with complex geology. 2D electrical resistivity surveys were conducted near Yovanitsa port on Mount Athos in Northern Greece. The obtained results suggest that the ERT can be a powerful tool for delineating aquifers, reconstructing saltwater wedge geometry and contouring the zones with higher level of salinization which are necessary for the process of prevention.

ГЕОФИЗИЧЕН ПОДХОД ЗА МОНИТОРИНГ НА СОЛНИЯ КЛИН В КРАЙБРЕЖНИТЕ ЗОНИ

Янко Иванов, Атанас Кисьов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски", 1700 София; ianko@mail.bg, at.kisyov@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Като източник на питейна вода на много места по света се използват подземните води. Тяхната оценка и управление са изключително важни поради постоянното увеличаване на световното население. Изместването на сладката от солената вода е резултат както от антропогенна дейност, така и от природни феномени. Електросъпротивителната томография, реализирана с различни електродни схеми, е широко използван геофизичен метод за получаване на изображение с висока разделителна способност на райони с комплексна геология. Извършени са двумерни електротомографски изследвания в района на пристанище Йованица на полуостров Атон в Северна Гърция. Получените резултати показват ефективността на метода закартиране на хидрогеоложките условия,установяване на геометричните характеристики на солния клин и определяне на зоните с повишено съдържание на соли, които са необходими при планиране на превантивни дейности.

Introduction

The beauty, richness, wide variety of valuable habitats and ecosystems have made the costal zones one of the most popular settlement areas,tourist destinations, business zones and transit points. They are among the most productive areas in the world with currently more 200 million European citizens, stretching from the North-East Atlantic and the Baltic to the Mediterranean and Black Sea. Being heavily populated and excessively exploited in terms of natural resources puts costal ecosystems in a great risk. One of the critical phenomena which mainly effects these areas is contamination of the aquifers with seawater. The extent of saltwater intrusion (fig. 1) is a result of both natural processes (sea level rising, drought, changes in the timing of freshwater delivery to estuaries) and anthropogenic activities (damming rivers, freshwater removal for municipal, industrial or agricultural use, changes in freshwater inflow).

Estimation of salt intrusion can be made with the classical chemical methods measuring those parameters that best highlight the saline contamination as electrical conductivity and chloride concentration (Satriani et al., 2011). Alternatively, applied geophysical techniques characterizing the hydrogeology of coastal aquifers can be used. As saltwater intrusion may occur at different depths the most appropriate geophysical technique is the Electrical Resistivity Tomography (ERT). Performed with various electrode configurations the method is very effective for high resolution illustrations of near-surface resistivity anomalies.

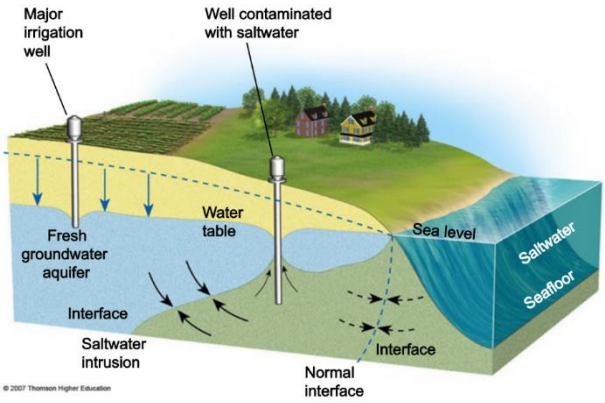


Fig. 1. Cross section of contacts between a coastal aquifer and saline groundwater (Miller and Spoolman, 2007)

Generally, all water contains dissolved chemical materials called "salts". When the concentration of these dissolved materials increases drastically, the water is referred to as "saltwater". As freshwater is usually consideredwater having a

total dissolved-solids concentration of less than 1,000 mg/L whereas saltwater ones as greater than 1,000 mg/L. The upper limit of freshwater can vary and is based on its suitability for domestic use. Concentration of 2,000 to 3,000 mg/L is considered the limit of water being too salty to drink. Waters with total dissolved-solids concentration of 1,000 to 35,000 mg/L are called "brackish" with upper concentration limit set at the approximate concentration of seawater of 35,000 mg/L (Table 1). When dissolved-solids concentration exceeds that of seawater, we have concentrated seawater usually called brine, in most cases containing mostly sodium chloride (Chitea et al., 2011; Barlow, 2003).

Table 1
Average concentrations of major dissolved constituents of seawater (Hem, 1989)

Constituent	Concentration (mg/L)
Chloride	19,000
Sodium	10,500
Sulfate	2,700
Magnesium	1,350
Calcium	410
Potassium	390
Bicarbonate	142
Bromide	67
Strontium	8
Silica	6.4
Boron	4.5
Fluoride	1.3

Higher salt level triggers a cascade of events that impact coastal ecosystems at different scales from small (cm to m) scale changes in sediment biogeochemistry and materials processing to large (m to km) scale alterations in the distribution of flora and fauna. Increased chloride (salt) and sulfate concentration are most likely the reason for the significant impact of saltwater intrusion in coastal zones. Small changes in chloride concentration can physiologically stress microorganisms, plants, and animals and alter metabolic pathways, rates of activity, and abundance. Sulfate is a terminal electron acceptor for anaerobic respiration that is present in limited amounts in freshwater but that is abundant in seawater. Changes in sulfate availability may result in dramatic changes in sediment biogeochemistry, which may drive ecosystem-level changes in plant and animal distributions (Joye, 2013).

Physical formulation

Saltwater intrusion occurs when aquifers in coastal areas have hydraulic contact with seawater as a result of the higher density of saltwater. As freshwater has a density of about 1,000 g/cm^3 at 20 °C, whereas the saltwater is slightly denser at about 1,025 g/cm^3, fresh water floats on top of the sea water resulting in amore or less well-defined salt/freshwater interface. Freshwater reservoirs on small islands can be lens shaped (fig.2). There is no distinct boundary between the salty sea water and fresh groundwater but rather a transition zone of intermixture known as brackish water.

In case of hydrostatic equilibrium and homogeneous aquifers, an estimate of the depth of this interface is given by the classical formulation of Ghijben (Drabbe et al., 1888 and Herzberg, 1901), which are the first physical formulations of saltwater intrusion deriving analytical solutions to approximate the intrusion behavior.

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \text{ , [m]}$$

h - thickness of the freshwater zone above sea level, [m];
z - thickness of the freshwater zone below sea level, [m];
ρ_f - density of freshwater, [kg/cm^3];
ρ_s - density of saltwater,[kg/cm^3].

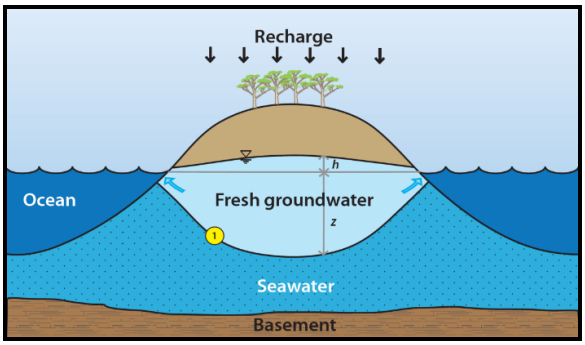


Fig. 2. Freshwater lens on a small island. The Ghijben-Herzberg relation provides an approximation of the lens thickness: z≈40h
1 - interface between seawater and groundwater (Werner et al., 2013)

In well-balanced groundwater conditions with known density of seawater and depth to the water table, the depth of salt/freshwater interface can be calculated (fig.3). However, if the equilibrium between freshwater and saltwater is disturbed by high pumping rates for water supply, the depth of the salt/freshwater interface is lowered and an enforced saltwater intrusion can occur (fig.4) (Kirsch, 2009).

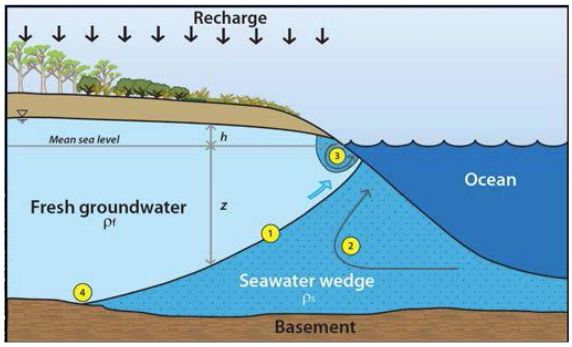


Fig. 3. Natural equilibrium of seawater and groundwater in an undisturbed system
1 - interface between seawater and groundwater; 2 - movement of water affected by density (ρ_s>ρ_f); 3 - movement driven by the tide; 4 - furthest extent of seawater intrusion (Werner et al., 2013)

The Holy Mountain

Cloaked by beautiful chestnut and other types of Mediterranean forest, the steep slopes of Mount Athos are punctuated by twenty imposing monasteries and their subsidiary establishments. Covering an area of just over

33,000 hectares, the property includes the entire narrow rocky strip of the easternmost of the three peninsulas of Chalcidice which jut into the Aegean Sea in northern Greece. The subsidiary establishments include sketae (daughter houses of the monasteries), kellia and kathismata (living units operated by the monks), where farming constitutes an important part of the monks' everyday life.

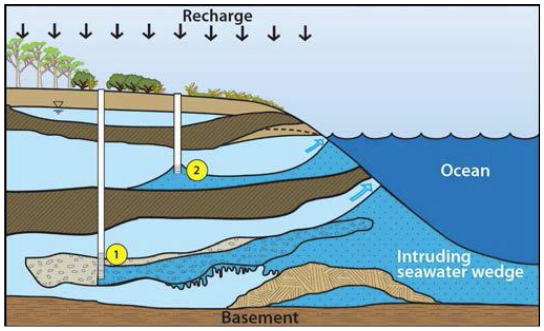


Fig.4. Seawater intrusion occurring in a more complex aquifer with human activity contributing
1 - seawater moving preferentially through high-permeability layers in the ground; 2 - excessive pumping drawing seawater upwards, causing the bore to become contaminated (Werner et al., 2013)

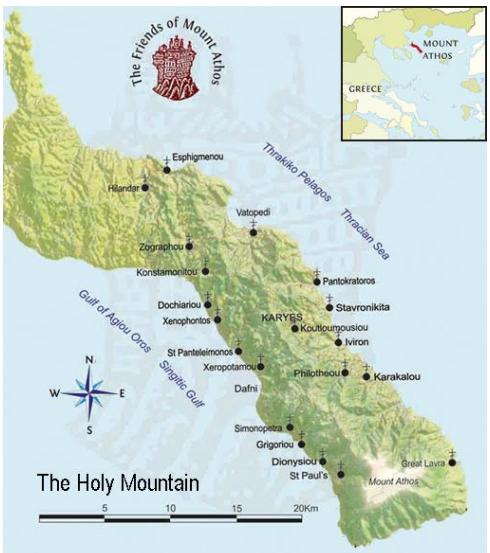


Fig. 5. Map of the Mount Athos Peninsula (The Friends of Mount Athos, 2016)

An Orthodox spiritual center since 1054, Mount Athos has enjoyed an autonomous statute since Byzantine times. Its first constitution was signed in 972 by the emperor John ITzimiskes. The 'Holy Mountain' (fig. 5), which is forbidden to women and children, is also a recognized artistic site. The layout of the monasteries (which are presently inhabited by some 1,400 monks) had an influence as far afield as Russia, and its school of painting influenced the history of Orthodox art. The landscape reflects traditional monastic farming practices, which maintain populations of plant species that have now become rare in the region. (UNESCO, World Heritage Centre)

Geological Settings of Mount Athos

The Mount Athos Peninsula belongs to the Serbo-Macedonian Massif (fig.6), a large basement massif within the Internal Hellenides. The south-eastern part of the Mount Athos peninsula is built by fine-grained banded biotite gneisses and migmatites forming a domal structure. The southern tip of the peninsula, which also comprises Mount Athos itself, is built by limestone, marble and low-grade metamorphic rocks of the Chortiatis Unit. The northern part and the majority of the western shore of the Mount Athos peninsula are composed of highly deformed rocks belonging to a tectonic mélange termed the Athos-Volvi-Suture Zone, which separates two major basement units: The Vertiskos Terrane in the west and the Kerdillion Unit in the east.

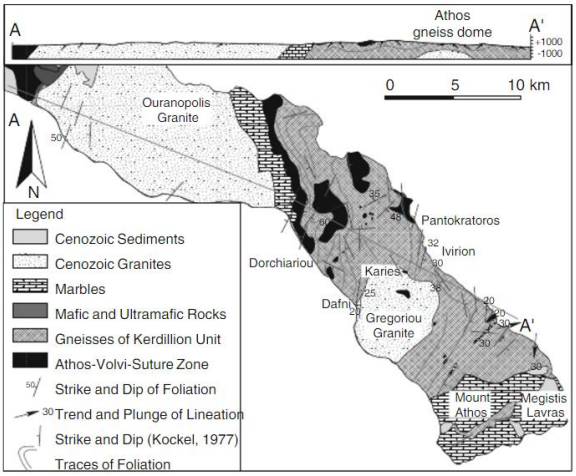


Fig. 6. Structure of the gneissdome on the Mount Athospeninsula (Himmerkus et al., 2011)

The rock-types in this mélange range from metasediments, marbles and gneisses to amphibolites, eclogites and peridotites. The gneisses are tectonic slivers of the adjacent basement complexes. The mélange zone and the gneisses were intruded by granites (Ierissos, Ouranoupolis and Gregoriou). The Ouranoupolis intrusion obscures the contact between the mélange and the gneisses. The granites are only slightly deformed and therefore postdate the accretionary event that assembled the units and created the mélange. (Himmerkus et al., 2011).

Bulgarian Ortodox Monastery Zograf

Named after the 13th or 14th century icon of Saint George the Zograf which is believed to mysteriously paint itself on the prepared board(zografos) the monastery exists since 980 as per the earliest written evidence. During the Middle Ages, Zograf monastery was generously supported by the Bulgarian rulers, such as Ivan Asen II and Ivan Alexander as a matter of pride. In 1275 the monastery was plundered and burnt down by Crusaders and rebuilt with the support of the Paleologan dynasty, as well as that of rulers of eastern Europe.

The monastery exists in its modern appearance since the 16th century, while its present-day buildings date from the middle 18th century. The south wing was built in 1750, the east in 1758, the small church in 1764 and the large one in 1801. (igs. 7, 8 and 9).

The north and west wing are from the second half of the 19th century and large-scale construction ended in 1896 with the Saints Cyril and Methodius Church and the raising of the bell tower.

Fig. 7. The east wing and the large church of Zograf monastery

Fig. 8. The north and west wings of Zograf monastery

Fig.9. The bell tower of Zograf monastery

Survey Summary

Geophysical approach of survey is based on physical measurements from which the spatial distribution of different physical properties of the rocks can be derived. Pore-water electrical conductivity and its inverse resistivity are the properties that can be related to hydrologic or geologic aspects of aquifers. Aquifers conductivity depends mainly on their porosity and the level of salinization of the water filling the pore space. Ground water conductivity increases when either porosity or concentration of dissolved ions increase. Mass movement of saltwater in zones of fresh water is localized by analyzing the spatial distribution of electrical conductivity (Barlow, 2013; Stewart, 1999).

Electrical Resistivity Tomography scans the subsurface along the survey line for both vertical and lateral variability of ground electrical resistivity using different electrode arrays. Variations in electrical resistivity usually correlate with variations in lithology, water saturation, fluid conductivity, porosity and permeability, which may be used to map stratigraphic units, geological structure, sinkholes, fractures and groundwater.

Traditionally, resistivity measurements involve four electrodes in standard configuration. Two current electrodes injecting low frequency electric current into the ground and two potential electrodes measuring the resultant voltage response which are then converted in resistivity value. The field set-up requires the deployment of an array of regularly spaced electrodes connected to a central control unit via multi-core cables. Resistivity data set is collected via combinations of systematical changes of the location of the four electrodes. The depth of investigation depends on the electrode spacing and the geometry of the used array. Incremental increase of the electrode spacing allows for successively deeper sub-surface levels to be investigated. The underlying resistivity distribution is computed by means of inverse modeling and used to produce a resistivity cross-section (Loke and Barker, 1996).

Fig.10. The coast near the western port of Hilandar Monastery -Yovanitsa

To investigate the hydrogeological conditions, 2D electrical resistivity surveys were conducted on the coast near the western port of Hilandar Monastery - Yovanitsa on Mount Athos in Northern Greece (fig.10). Measurements were carried out using twenty-four electrodes connected by a multi-core cable to the ABEM Terrameter SAS 1000 with a maximal current output of 100 mA. The electrodes were positioned in straight profile lines with a constant spacing using a Wenner-Schlumberger resistivity array. The electrical survey was based on four measuring profiles located close to the sea line (fig. 11).

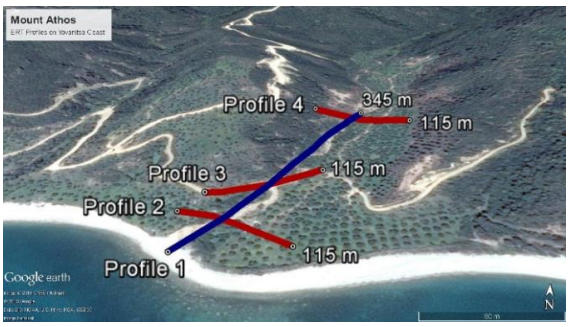


Fig.11. Location of the ERT profiles on Yovanitsa coast

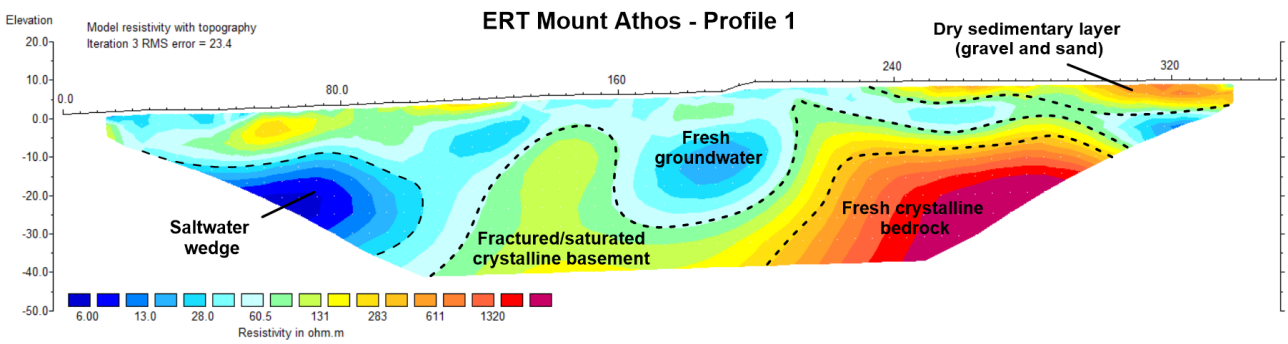


Fig.12.Geoelectrical resistivity cross-section of Profile 1 (345 m)

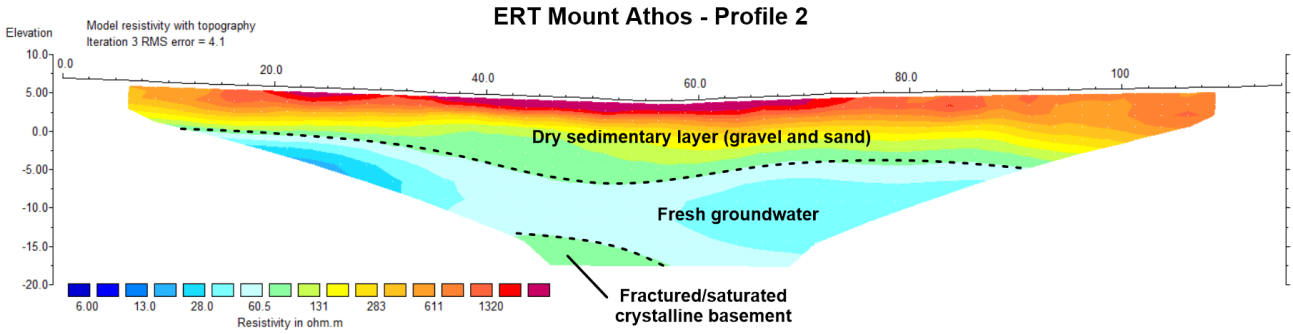


Fig. 13.Geoelectrical resistivity cross-section of Profile 2 (115 m)

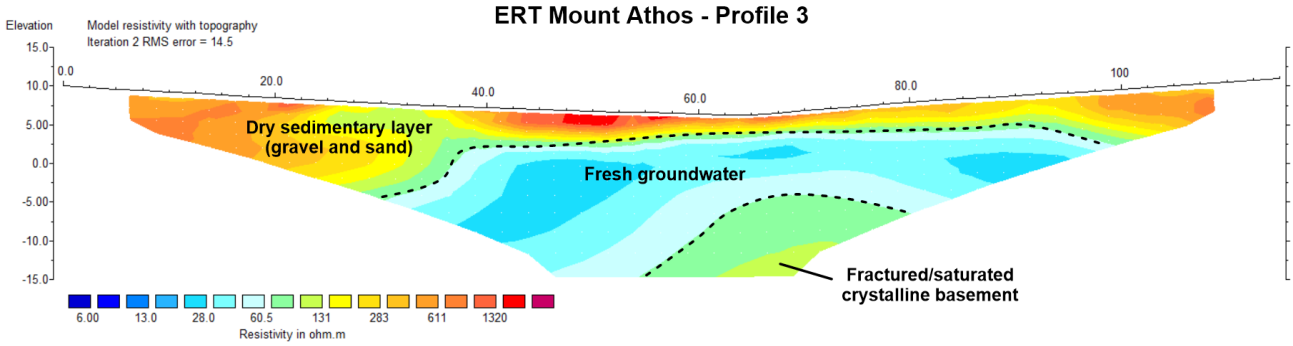


Fig.14. Geoelectrical resistivity cross-section of Profile 3 (115 m)

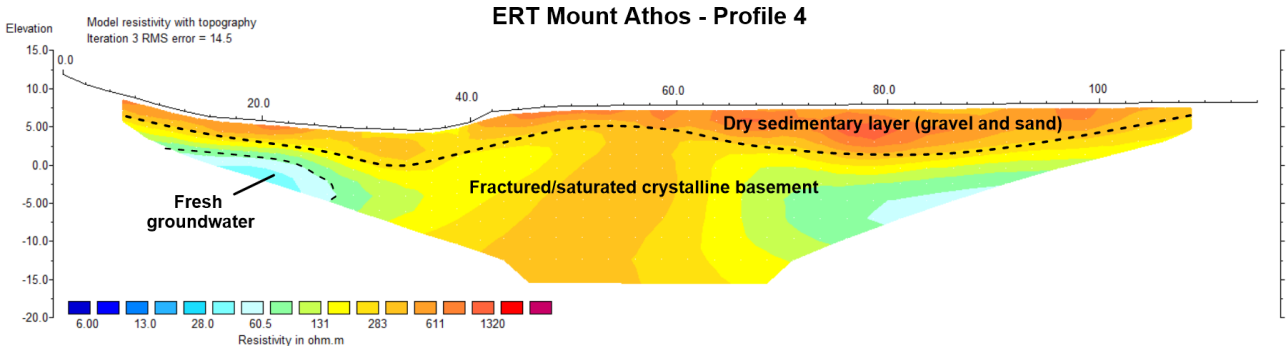


Fig.15. Geoelectrical resistivity cross-section of Profile 4 (115 m)

The long profile (fig. 12), which purpose is to delineate the aquifer and reconstruct the geometry of the saltwater wedge, has a total length of 345 m. It is oriented in North-South direction perpendicularly on the coastline with a step of 10 m between the electrodes on the surface. The maximum achieved depth of the investigation is about 40 m.

Additionally, three more profiles (figs. 13, 14, 15), positioned perpendicularly to the main profile, were performed for detailed evaluation of the geological conditions. The profiles are placed 60, 130 and 320 m off the sea line. They have a total length of 115 m each, distance of 5 m between the electrodes on the surface and a maximum achieved depth of the investigation about 20 m.

The derived resistivity images clearly delineate four main geoelectrical zones: sedimentary cover, saltwater wedge, groundwater aquifer and crystalline basement.

- *Sedimentary Cover*

The top layer, which is partially seen on Profile 1 (fig.12)and clearly outlined on Profiles 2, 3 and 4 (figs. 13, 14 and 15) has electrical resistivity varying between 500 and 3000 Ωm. It corresponds to dry sedimentary layer composed from gravel and sand. The very resistive upper part exposed on Profile 2 and 3 (figs. 13 and 14) follows the gravel roads on the site.

- *Saltwater Wedge*

There sistivity cross-section of Profile 1 (fig.12) clearly contours a tongue-shaped featureat a depth of about 10 munder the Earth surface, which intrudes into the coast to a distance of 100 m. This highly conductive zone with resistivity values between 6 - 10 Ωmrepresents the geometry of the saltwater wedge and the contact between the salty seawater and the fresh groundwater.

- *Groundwater Aquifer*

Near the surface, alongside the whole cross-section of Profile 1 (fig.12) occurs a geo-electric layer with moderate resistivity of about 30 Ωm and a deeper central part of about 25 m. This conductive layer is also found on Profiles 2, 3 and partially 4 (figs. 13, 14 and 15) andmapsthe fresh water aquifer.

- *Crystalline Basement*

The fresh groundwater layer is underlined by fractured/saturated crystalline basement with resistivity values between 150 and 700 Ωm visible on all profiles. The high resistivity values between 1400 -3000 Ωmobservedat depthon Profile 1 (fig.12) characterize the fresh crystalline bedrock.

Conclusion

Combination of both natural process and anthropogenic activities, lead to contamination of the fresh groundwater reserves with salty seawater. The cost and the time needed for groundwater remediation make the processes of monitoring and managing crucial for preservation of coastal areas of great environmental, economic, social and cultural importance.

The derived near surface, high resolution resistivity images suggest that geophysical approach of investigation and the Electrical Resistivity Tomography in particular is highly effective for delineating aquifers, reconstructing saltwater wedge geometry, contouring zones with higher level of salinization and detecting resistivity contrasts caused by interfaces between highly conductive seawater and saturated fresh water layers.

References

Barlow, Paul M. Ground *Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast. 2003.* -113p.

Chitea, F., P. Georgescu, D. Ioane. *Geophysical detection of marine intrusions in Black Sea coastal areas (Romania) using VES and ERT data.* Geo-Eco Marina, 201. -95-102.

Drabbe, J., Ghijben, Badon W. *Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij.* Amsterdam. Tijdschrift Kon. Inst. v. Ingenieurs, Verh. 1888/1889. - 8-22.

Hem, J. D. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3d ed.): U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 1989. -272p.

Herzberg, A. Die Wasser versorgung einiger Nordseebäder. - *J. Gasbeleucht, Wasser versorg*, 44, 1901. -363p.

Himmerkus, F., Zachariadis, P.,Reischmann, T., Kostopoulos D. *The basement of the Mount Athos peninsula, northern Greece: insights from geochemistry and zircon ages,* Springer-Verlag, 2011. - 1467-1485.

Joye, Samantha. *Salinization of Coastal Freshwater Wetlands: Assessing the Long-Term Impacts of Salt Versus Sulfate Addition on Ecosystem Functio*n, University of Georgia. 2013. - 558-568.

Kirsch, R. *Groundwater Geophysics - A tool for Hydrogeology* 2nd Ed. 2009. - 471p.

Loke, M. H., Barker, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. - *Geophysical Prospecting*. 1996. - 131-152.

Miller, G.T, S.E. Spoolman. *Living in the Environment*, Brooks/Cole-Thomson Learning, Pacific Grove. 2007. - 828p.

Satriani, A., A. Loperte, M. Proto. Electrical resistivity tomography for costal salt water intrusion characterization along the Ionian coast of Basilicata region. 2011. - 1-12.

Stewart, M.T.*Seawater intrusion in coastal aquifers – Concepts, methods and practices*, Geophysical investigations, Kluwer Academic Publishers.1999. -590p.

The Friends of Mount Athos, 2016. http://www.athosfriends.org/

Werner, Adrian D. Jacobsen, E. Peta, Leanne K. Morgan. *Understanding seawater intrusion*, Earth Sciences Collection, Flinders Academic Commons, Adelaide, South Australia. 2013. [Poster].

The article is reviewed by Assist. Prof. Dr. Maya Grigorova and recommended for publication by the Department „Applied Geophysics".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

МНОГОГОДИШНИ ГРАВИМЕТРИЧНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА КРУПНИШКИЯ ПОЛИГОН

Ради Радичев[1], Емил Михайлов[2], Димитър Димитров[2], Християн Цанков[1]

[1] Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски", 1700 София, radirad@mgu.bg
[2] Национален институт по геофизика, геодезия и география - БАН, 1700 София, emil_mih@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Дадени са резултати от многогодишни гравиметрични измервания на Крупнишкия полигон, извършени, както по еднократна методика с по-голям брой контролни точки, така и по методиката тройна стъпка (двоен възел) с различни видове гравиметри. При 4 епохи на измерване, гравиметрите са еталонирани на Софийския гравиметричен полигон и Калибровъчната линия на БАН, а при две епохи - на НЕГП (Национален еталонен гравиметричен полигон). От резултатите от еталониране на НЕГП се вижда, че същият е изменил еталонните си значения след 2003 година под въздействието на различни геодинамични процеси. Необходимо е еталонните полигони, изцяло или частично да се преизмерват през 5 години с абсолютни гравиметри. Резултатите от извършените до сега многогодишни гравиметрични измервания в района на Крупник, също така ни показват какво е състоянието на част от гравиметричната апаратура в България, за да може същата да се използва за геофизични и геодезични цели.

Ключови думи: Крупнишки разлом, гравиметрия, геодезия, геодинамика, геофизика

LONG-STANDING GRAVIMETRIC MEASUREMENTS OF THE KRUPNIK POLYGON

Radi Radichev[1], Emil Mihaylov[2], Dimitar Dimitrov[2], Christian Tzankov[1]
[1] University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, radirad@mgu.bg
[2] National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – BAS, emil_mih@abv.bg

ABSTRACT. The paper presents the long term results of gravity measurements of the Krupnik polygon performed on the one hand by a single step methodic comprising larger number of control points and on the other triple step methodic (double knot) with different types of gravimeters. During four epochs the gravimeters were calibrated on Sofia's gravimetric polygon and BAS's Calibration profile. While in another two epochs they were calibrated on the National Reference Gravimetric Polygon (NRGP). The results from the NRGP calibration show that its reference values have changed after 2003, probably under the influence of influence of various geodynamic processes. Therefore, it is necessary the reference polygons to be partly or fully re-measured by using absolute gravimeters every five years. The results from the long-standing gravity measurements around Krupnik region also show us in what condition part of the available in Bulgaria gravimetrical equipment is.

Keywords: Krupnik fault, gravimetry, geodesy, geodynamics, geophysics

Общи положения

При профилна снимка, а също и при площна снимка, измерванията на гравиметричните точки се извършват по еднократна методика. Тя е най-производителна и най-малко надеждна по отношение на качеството. При извършване на измерванията отсъства текущ контрол и отделните точки, а може и участъци от рейса да бъдат деформирани заради изместване на нулата на гравиметъра. Затова се правят допълнителни контролни измервания по точките от около 10% от общият им брой. По тези допълнителни измервания се изчисляват средните квадратни грешки от наблюдение. По-големи разлики в гравиметричния рейс от допустимите е необходимо да се бракуват. Трябва рейсовете да се включват в опорни точки, измерени по тристъпкова (двоен възел) методика. Необходимо и обезателно е при еднократни измервания да се използват 2 гравиметъра, като по този начин се получават по 2 „Δg" на точка, а на опорните и контролните точки по 4 и повече „Δg". Ако се използва 1 гравиметър е необходимо гравиметричните измервания да се извършат по еднократна методика с повторения на всички точки т.е. да имаме по 2 „Δg" на точка, а на опорните и контролните по 3 или 4 „Δg".

Изместване на „нулата" на употребяваните в България кварцови гравиметри от вида ГАК-7Т, ГР/К2, ГНУ-КВ и ГНУ-КС

Нестабилността на хода на нулите на гравиметрите зависи от температурния хистерезис, проявяващ се в несъвпадане ходовете на температурните характеристики в прав и обратен ход на изменение на температурата, които могат да достигнат до милигали. Причини за такова съвпадане са пространствените градиенти на температурата и различие в температурните характеристики на отделните възли в кварцовите системи. Определянето на температурния хистерезис може да стане по специална програма на наблюдение с гравиметрите. Необходимо е да се знае, че при вакуумиран корпус на гравиметъра се изменя вида на температурната характеристика и температурния хистерезис. Действителното изместване нулите на гравиметрите има сложен характер и не може да

бъде прогнозирано напълно. Вълнообразното изменение на нулите на гравиметрите с време даже до 1 час е обусловено от процесите на поляризация на кварцовите системи. Замяната на вълнообразната линия на изместване на нулевата точка с права, както се практикува в гравиметрията е малко приблизително и довежда до понижаване точността на резултатите при високоточни гравиметрични измервания. Обикновено наблюденията с различни статични гравиметри са съпроводени с големи систематични разхождания на резултатите между тях (Михайлов, 1998). Понеже наблюденията с два и повече гравиметъра се провеждат по едно и също време и при едни и същи условия, разликите имат систематичен и случаен характер и са свързани с техническите особености на приборите и с микросеизмиката създавана от движещите се превозни средства в близост до гравиметричните точки. Разликите между приборите са обусловени и от криволинейното изместване на нулите им и от колебание на мащабните коефициенти на отчетните устройства от транспортиране на гравиметрите.

Използване на гравиметри от вида ГАК-7Т, ГР/К2, ГНУ-КВ и ГНУ-КС за гравиметрични снимки в Република България

Тези гравиметри може да се прилагат за детайлни, регионални и маршрутни (профилни) снимки с разстояния между точките от десетки метри до 10-15 km и повече. Основни части на всеки гравиметър са: измерителна част със собствения корпус на гравиметъра и външния корпус с топлозащитния стълб за пренасяне на гравиметъра. Цялата измерителна част е поместена в съда на Дюар, обезпечаващ надеждна защита на системата от резки температурни изменения на обкръжаващата среда. В гравиметъра е монтиран температурен компенсатор, действащ ефективно в диапазон на температурите от –15^0 до +15^{0}C от точката на пълна температурна компенсация. Средната им грешка на измерване се колебае от ±0,030 до ±0,060 mGal, а при гравиметър ГНУ-КВ тя е до ±0,030 mGal. Гравиметрите на НИГаФ – ЕООД с номера 1514, 689 и 1388, както и гравиметъра на УАСГ номер 524, бяха със специално изготвени кварцови системи в Гравиметричната лаборатория гр. Бургас от С. В. Вереда. Такива системи се изготвяха за всички гравиметри в наличност на Геофизичните предприятия. Тези системи са с по-висока чувствителност и точност на отчета около 0,010 mGal. Модернизирането на тези системи се състои в свеждане до минимум величината на пълзене на нулевата точка, неутрализация (йонизация) на електростатическите заряди, съществена компенсация на температурните влияния и премахване на вредни колебания на махалото на системата. Затова при тези гравиметри, може би е по-добре, да се използват мащабните коефициенти получени на специални полигони, а не в лабораторни условия в предвид на това, че системите на тези гравиметри видимо изменят своите свойства след като бъдат изведени от състояние на покой (т.е. при транспортиране с автомобил). Най-добре е калибрирането (еталонирането) на тези гравиметри да се извършва преди започване на гравиметричните измервания и след завършването им. Калибрирането на гравиметрите до 2004 година се извършва в Гравиметричната лаборатория на НИГиФ, както по метода на наклона (Михайлов, 2012, Радичев и др., 2013), така и на Софийския гравиметричен полигон. Извършва се сравняване на мащабните коефициенти при двата метода.

Гравиметрични измервания в района на Крупнишкия разлом

Измерванията в района на Крупнишкия разлом са извършени през годините 2004, 2007, 2008, 2009, 2012 и 2013. През 2004 и 2007 години измерванията са извършени с гравиметър ГАК-7Т № 524, собственост на УАСГ София. От Минно-геоложкия университет бяха използвани два гравиметъра ГР/К2 № 1319 и ГНУ-КВ № 296, с които бяха извършени измерванията през 2008 г. Всичките горепосочени гравиметри са проверени и еталонирани на Софийския еталонен гравиметричен полигон и на Калобровъчната линия на БАН.

През месец април 2009г. се извършиха измервания на Крупнишкия разлом с гравиметри от Минно-геоложкия университет ГР/К2 № 1319 и ГНУ-К2 № 138. Те също бяха проверени на Софийския еталонен полигон и на Калибровъчната линия на БАН в края на месец март 2009г. През 2012г. измерванията на полигона са извършени с 3 гравиметъра - от УАСГ 2 гравиметъра ГАК-7Т № 524 и ГАК-7Т № 71 и 1 гравиметър на фирма „Геохайд" ГНУ-КС № 588. През 2013г. измерванията са извършени с 1 гравиметър на УАСГ, а именно ГАК-7Т № 524. Еталонирането на гравиметрите през 2012 и 2013 г. е извършено на НЕГП (Национален еталонен гравиметричен полигон) Видин-Мелник. Гравиметричните измервания на Крупнишкия полигон през 2004, 2007 и 2013г. са извършени по еднократна методика с повторения на почти всички точки и с контролни точки А-1-2-3-4-5-3-2-А-1-2-3-4-5 за реперите от първия профил и тройна стъпка А-1-А-1-2-1-2..., за реперите от втория профил. През 2008, 2009 и 2012г. измерванията са извършени по еднократна методика с контролни точки А-1-2-3-4-А-2-4 за реперите на първи профил и тройна стъпка А-1-А-1-2-1-2... за втори профил. Средната квадратна грешка при първите две епохи на измерване се колебае от ±0,031 до ±0,120 mGal, а за третата епоха средната квадратна грешка на измерване е в границите от ±0,019 до ±0,138 mGal за гравиметър № 1319 и от ±0,028 до ±0,099 mGal за гравиметър № 296. За четвъртата епоха средната квадратна грешка за гравиметър № 1319 е от ±0,025 до ±0,178 mGal, а за гравиметър № 138 се колебае в границите от ±0,024 до ±0,264 mGal. За епоха 2012 средната квадратна грешка за гравиметър ГАК-7Т № 524 е до ±0,299 mGal, за гравиметър ГАК-7Т № 71 до ±0,337 mGal и за гравиметър ГНУ-КС № 588 е до ±0,288 mGal, от еднократни измервания с контролни точки с трите гравиметъра. Измерванията с 3 гравиметъра по методиката тройна стъпка се колебаят от ±0,020 до ±0,250 mGal. През епоха 2013 средните квадратни грешки на измерванията извършени с гравиметър ГАК-7Т № 524 се колебаят от ±0,040 до ±0,310 mGal за двете методики на измерване. От експериментални гравиметрични измервания по линии от Държавната нивелация на Република България, извършени с гравиметри собственост на Минно-геоложкия университет и

УАСГ са получени резултати, които показват, че изместването на нулевата точка на гравиметрите е линейно до 1 или 2 часа. От Таблица 1 (Радичев и др., 2013; Ценков и др., 2011) се вижда, че до около 1 час гравиметричните измервания не се повлияват съществено от приливните изменения на силата на тежестта, и същите не се включват отделно при обработка на гравиметричните измервания. Изчислява се изместването на нулевите точки на гравиметрите от по-голям брой опорни и работни гравиметрични точки. Както се вижда от таблица 1, средните квадратни грешки на звено от 7 до 8 репера, измерено за около 1 час или 1 час и 35 минути са до ±0,100 mGal. При времетраене над 2 – 3 часа средните грешки скачат под и над ±0,300 mGal. До около 1 час или 2 часа изместването на нулите на гравиметрите може да се счита за линейно.

Таблица 1.

Ср. квадр. грешка	Време на измерване	Брой репери	Гравиметри номера	Собственост на приборите
±0,002	0 часа 40 мин.	4	ГР/К2 № 138	МГУ
±0,016	0 часа 42 мин.	4	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,055	0 часа 53 мин.	5	ГР/К2 № 138	МГУ
±0,024	0 часа 50 мин.	5	ГНУ-КВ № 296	МГУ
±0,097	0 часа 47 мин.	5	ГР/К2 № 138	МГУ
±0,072	0 часа 45 мин.	5	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,016	1 час 10 мин.	7	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,088	1 час 12 мин.	7	ГР/К2 № 138	МГУ
±0,074	1 час 12 мин.	7	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,055	1 час 10 мин.	7	ГАК-7Т № 71	УАСГ
±0,077	1 час 20 мин.	8	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,055	1 час 22 мин.	8	ГАК-7Т № 71	УАСГ
±0,086	1 час 30 мин.	8	ГАК-7Т №524	УАСГ
±0,097	1час 35 мин.	8	ГАК-7Т № 71	УАСГ
±0,099	2 часа 40 мин.	13	ГНУ-КВ № 296	МГУ
±0,285	2 часа 45 мин.	13	ГР-К2 № 138	МГУ
±0,295	2 часа 45 мин.	15	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,289	2 часа 47 мин.	15	ГАК-7Т № 71	УАСГ
±0,237	2 часа 56 мин.	17	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,376	3 часа 00 мин.	17	ГАК-7Т № 71	УАСГ
±0,337	3 часа 50 мин.	21	ГАК-7Т № 524	УАСГ
±0,312	3 часа 50 мин.	21	ГР/К2 № 138	МГУ

Систематични и инструментални грешки от измерванията на Крупнишкия полигон

Грешките от измерване, произхождащи от определен източник и имащи закономерен характер, се наричат систематични грешки. Грешките, обусловени от неточността на инструмента, се наричат инструментални грешки. От Таблица 2 се вижда, че разликите в „*g*" на реперите между различните години на измерване, с различни инструменти се колебаят различно при измерванията, както по еднократната методика с контролни точки, така и при тристъпковата методика на Крупнишкия полигон. По големите разлики в „*g*" от над ±0,40 mGal при измерванията, през различните години са на брой 10. Останалите 163 репера са под тази точност. Гравиметричната снимка за карта аномалия Буге в мащаб 1:200 000 трябва да е с точност на измерване до ±0,40 mGal (Юзефович, Огородова,1980). Тази снимка, задачата, на която е откриването на геологически обекти в райони, перспективни на полезни изкопаеми, се нарича търсеща снимка. И от нея се съставят карти на аномалии Буге в мащаби 1:200 000 – 1:100 000 със сечение 1-2 mGal. Следователно данните от Таблица 2 свидетелстват за наличието на определени инструментални грешки за различните гравиметри, с които е измерван полигонът през различните години. Към инструменталните грешки спадат:

- изместване на нулевата точка;
- температурни влияния;
- нелинейност на скалата на гравиметъра;
- ексцентрицитет на микрометъра;
- пренастройване на диапазона;
- грешки, зависещи от оператора.

Изводи

Мащабните коефициенти на гравиметрите, с които са извършени измерванията през 2012 и 2013г., са получени от еталониране на НЕГП (Национален еталонен гравиметричен полигон) Видин – Мелник. След 1986г. НЕГП не е преизмерван и е възможно, макар и минимално изменение на еталонните отсечки от геодинамичните процеси в този район. Това се вижда от Таблица 3, където имаме по 5 стойности на δ*g* по-големи от ±0,200 mGal от разликите SR.g-2012 и SR.g-2013, т.е. от средната стойност на „*g*" от измерванията на всички епохи, минус „*g*" за всяка епоха. Тъй като точността на Еталонната гравиметрична мрежа е под ±0,200 mGal за „*g*" (Михайлов, 1998) е приета тази точност, защото и двата хода са привързани към точките от Еталонната мрежа в Благоевград, Кресна и Разлог. Гравиметрична точка 1042 /Гара Пирин/ е унищожена и затова в Таблица 3 е записано „не". Необходимо е, при следващи измервания на полигона, гравиметрите да се калибрират (еталонират) на Софийския полигон или на Калибровъчната линия на БАН. Еталонните отсечки на част от Софийския полигон и на

Таблица 2.

g.t.	δg [mGal]										
	2007-2004	2008-2004	2009-2004	2012-2004	2013-2004	2013-2007	2013-2012	2012-2009	2009-2008	2008-2007	2007-2004
1001	-0,02	0,09	-0,02	-0,17	-0,03	-0,01	0,14	-0,15	-0,11	0,11	-0,02
VNR83	-0,12	-0,08	-0,21	0,36	**0,58**	**0,70**	0,22	**0,57**	-0,13	0,04	-0,12
VNR371	0,26	0,25	0,25	-0,01	0,30	0,04	0,31	-0,26	0,00	-0,01	0,26
1004	0,32	**0,46**	-0,05	-0,39	0,31	-0,01	**0,70**	-0,34	**-0,51**	0,14	0,32
1005	0,15	0,21	-0,13	**-0,43**	0,10	-0,05	**0,53**	-0,30	-0,34	0,06	0,15
R0	-0,10	0,00	-0,19	0,02	0,15	0,25	0,13	0,21	-0,19	0,10	-0,10
1047	-0,05	0,04	-0,10	0,05	0,29	0,34	0,24	0,15	-0,14	0,09	-0,05
NR114	-0,20	-0,18	-0,06	-0,28	-0,09	0,11	0,19	-0,22	0,12	0,02	-0,20
R7	-0,17	0,05	-0,17	-0,05	-0,01	0,16	0,04	0,12	-0,22	0,22	-0,17
R8	-0,26	-0,21	-0,20	-0,12	-0,11	0,15	0,01	0,08	0,01	0,05	-0,26
R10	0,13	0,09	0,08	0,11	-0,25	-0,38	-0,36	0,03	-0,01	-0,04	0,13
1040	0,24	0,01	0,17	0,10	-0,03	-0,27	-0,13	-0,07	0,16	-0,23	0,24
1042	-0,03	0,11	0,02	0,03	унищожен	унищожен	унищожен	0,01	-0,09	0,14	-0,03
2008	0,08	-0,01	-0,22	-0,40	-0,06	-0,14	0,34	-0,18	-0,21	-0,09	0,08
2014	-0,27	-0,18	0,03	-0,38	0,13	0,40	**0,51**	**-0,41**	0,21	0,09	-0,27
2020	-0,07	0,04	-0,02	-0,20	-0,21	-0,14	-0,01	-0,18	-0,06	0,11	-0,07

Таблица 3.

SR.g-2004 [mGal]	SR.g-2007 [mGal]	SR.g-2008 [mGal]	SR.g-2009 [mGal]	SR.g-2012 [mGal]	SR.g-2013 [mGal]
-0,025	-0,005	-0,115	-0,005	0,145	0,005
0,088	0,208	0,168	**0,298**	**-0,272**	**-0,492**
0,175	-0,085	-0,075	-0,075	0,185	-0,125
0,108	**-0,212**	**-0,352**	0,158	**0,498**	**-0,202**
-0,017	-0,167	**-0,227**	0,113	**0,413**	-0,117
-0,020	0,080	-0,020	0,170	-0,040	-0,170
0,038	0,088	-0,002	0,138	-0,012	**-0,252**
-0,135	0,065	0,045	-0,075	0,145	-0,045
-0,058	0,112	-0,108	0,112	-0,008	-0,048
-0,150	0,110	0,060	0,050	-0,030	-0,040
0,027	-0,103	-0,063	-0,053	-0,083	**0,277**
0,082	-0,158	0,072	-0,088	-0,018	0,112
не	не	не	не	не	не
-0,102	-0,182	-0,092	0,118	**0,298**	-0,042
-0,112	0,158	0,068	-0,142	**0,268**	**-0,242**
-0,077	-0,007	-0,117	-0,057	0,123	0,133

Калибровъчната линия на БАН са измерени през 2007г. с компютризиран гравиметър Scinyrex CG-5 и затова тези данни са по-меродавни от еталонните отсечки от НЕГП измервани до 1986 г. Мащабните коефициенти, определяни на Софийския еталонен гравиметричен полигон и на Калибровъчната линия на БАН, са еднакви в рамките на точността за останалите епохи на измерване на Крупнишкия полигон, а те са 2004, 2007, 2008 и 2009. Тези коефициенти, определени както на НЕГП, така и на Софийския полигон и Калибровъчната линия са с относителна грешка до $1x10^{-4}$, спрямо еталонните отсечки. Както се вижда, сложен е въпросът с еталонните полигони, доколко те задават с най-високо достижима точност мащабните коефициенти на гравиметрите. Без да се знаят параметрите на нестабилност на гравитацианното поле в районите на НЕГП, на Софийския полигон и на Калибровъчната линия на БАН, е много трудно да се оцени фактическа им точност. Необходимо е преизмерването на еталонните полигони или част от тях да става за период по-малък от 10 години, например през 5 години чрез абсолютни гравиметри. Абсолютните гравиметри засега осигуряват точност ±2-3 μGal на „*g*“, която е напълно достатъчна за определяне на мащабните коефициенти на гравиметрите с относителна грешка от порядъка на $1x10^{-4}$. От резултатите от измерванията, извършени през различните епохи се вижда, че инструменталните грешки през различните години на измерване на VNR83 са по-големи, понеже измерванията се извършват направо върху земната повърхност, тъй като няма бетонна площадка и шосето Видин-Кулата е на около 10 m от репера, при което се усеща сеизмиката от движещите се превозни средства. Реперите 1004 и 1005 са на гарите Симитли и Черниче (Крупник), около които има голямо движение на превозни средства и хора. Също по-големи разлики през годините има и на репер 2014 (голям мост над река Еловица) от натовареното движение на превозни средства по пътя Симитли-Предела-Банско. Тези по-големи разлики през различните епохи на измерване ясно се виждат от Таблица 2. Резултатите от извършените до сега многогодишни гравиметрични измервания в района на Крупник, показват какво е състоянието на част от гравиметричната апаратура в България, за да може същата да се използва за геофизични и геодезични цели.

Литература

Михайлов, Е. Анализ на еталонната гравиметрична мрежа на Република България. – *Год. на УАСГ – София*, т. XXXIX, св. III, 1998. - 233–240.

Михайлов, Е. Резултати от промяна мащабните коефициенти във времето на статичните кварцови гравиметри използвани в Република България. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 5-6, 2012. - 21-23.

Радичев, Р., Е. Михайлов, Н. Кирилов. Методика на наблюденията при профилни гравиметрични снимки по линии от Държавната нивелация на Република България. – *Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“*, т. 56, св. I, Геол. геоф. 2013. - 112-117.

Ценков, Ц., Т. Беляшки, Е. Михайлов. Получаване на гравиметричните поправки по линии от държавната нивелация на Р. България. – *Докл. на XI международна научна конф. ВСУ „Любен Каравелов” от 2 до 3 юни 2011, София*, т. II, VI-13 – VI-18. 2011.

Юзефович, А. П., Л. В. Огородова. *Гравиметрия*. М., Недра, 1980. - 320 с.

Статията е рецензирана от проф. дгн Стефан Димовски и е препоръчана за публикуване от кат. “Приложна геофизика”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and geophysics, 2016

ИСТОРИЧЕСКА СПРАВКА ЗА МЕТРОЛОГИЧНОТО ОБЕЗПЕЧАВАНЕ НА СТАТИЧНИТЕ ГРАВИМЕТРИ ИЗПОЛЗВАНИ ОТ ГЕОФИЗИЦИ И ГЕОДЕЗИСТИ В БЪЛГАРИЯ

Ради Радичев [1], Емил Михайлов [2]

[1] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, radirad@mgu.bg
[2] Национален институт по геофизика, геодезия и география - БАН, emil_mih@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Дадена е подробна историческа справка за създаването на Гравиметричната лаборатория за ремонт на гравиметри в град Бургас и за нейната работа. Също така подробно е описано създаването на Лаборатория за изследване и еталониране на гравиметри в НИИГиФ – София. Описана е цялата история по изследване и еталониране на гравиметри в България, както на полигони, така и по метода на наклона за геофизични и геодезични цели.

Ключови думи: Гравиметрия, геодезия, гравиметри, геофизика

HISTORICAL OVERVIEW OF THE METROLOGICAL MAINTENANCE OF STATIC GRAVIMETERS USED BY THE BULGARIAN GEOPHYSICISTS AND GEODESISTS

Radi Radichev [1], Emil Mihaylov [2]
[1] University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, radirad@mgu.bg
[2] National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – BAS, emil_mih@abv.bg

ABSTRACT. The report provides detailed historical reference about the establishment of the Gravimetric Laboratory for Servicing Gravimeters – Burgas, as well as its activities. Also, detailed description of the establishment of the Laboratory for Testing and Calibration of Gravimeters at the Research Institute of Geodesy and Photogrammetry – Sofia is included too. The full facts concerning the research and calibration of gravimeters in Bulgaria are presented, including closed polygon and slope-change techniques, which are used for calibration of the instruments for geophysical or surveying purposes.

Keywords: Gravimetry, geodesy, gravimeters, geophysics

Въведение

За решаване на много задачи, както от научен, така от приложен характер в областта на геофизиката и геодезията, е необходимо глобално изучаване на гравитационното поле на Земята. При това с всеки изминат ден изискванията за определяне на неговите параметри нарастват (Козякова и др., 1979). Затова е необходимо да се разработят методи и измерителни средства, позволяващи да се получи във всяка точка на земното кълбо със зададена точност значението на ускорението на силата на тежестта в единна система от физически единици.

В миналото като единствен метод, позволяващ да се създаде единна световна мрежа от опорни точки, е бил махалният метод. Махалните измервания биват махални относителни и махални абсолютни. В последните години за тази цел се използват абсолютните балистични гравиметри с лазерни устройства и криогенните гравиметри. Тези прибори могат да се използват за създавате на опорни мрежи. В качеството на прибори за масови гравиметрични измервания се използват различни модификации гравиметрите, като например западните Шарп, Уорден, Сцинтрекс, Содин от кварцовите и металическият Ла Коста и Ромберг, а в България руските гравиметри от вида ГАК, ГР/К2, ГНУ-КС и ГНУ-КВ. Също така масово се използват създадените в последно време компютризирани гравиметри от вида Scintrex CG-3 и CG-5.

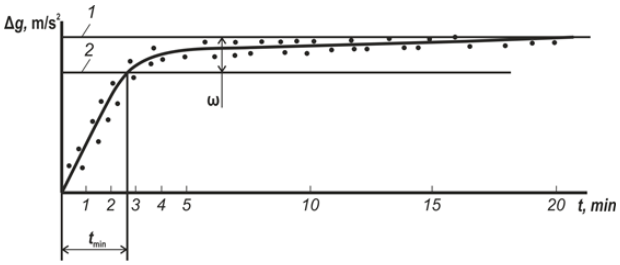
Гравиметричната система IGSN-71 е длъжна да запази мащаба на сухопътните гравиметрични снимки с точност 1.10^{-5} Gal. Тази система трябва да се пренесе и върху националните опорни мрежи, а след това и върху самите снимки. Необходимо е разработването на методи, позволяващи показанията на гравиметрите, изразени в система измерителни единици на скалата, да се приведат в системата физически единици, или, както се казва, да се извърши еталониране /калибриране/ на гравиметрите (Козякова и др. 1979). Изискванията за тази дейност са доста високи. Необходимо е да се знаят мащабните коефициенти на гравиметрите с грешка от порядъка на $\pm1.10^{-5}$ Gal за западните гравиметри и $\pm1.10^{-4}$ Gal за руските гравиметри от вида ГАК, ГР/К2, ГНУ-КС и ГНУ-КВ. Еталонирането на гравиметри с такава точност се явява

една от най-трудните задачи на експерименталната гравиметрия.

Опитът в България показва, че проблемът с точността и качеството на гравиметричните измервания е най-непосредствено свързан и с проблема на изследването и еталонирането на гравиметри (Михайлов, 1989, Михайлов и Радичев, 2011), т.е. метрологичното им обезпечаване.

Изследване и еталониране на гравиметри за геофизични цели

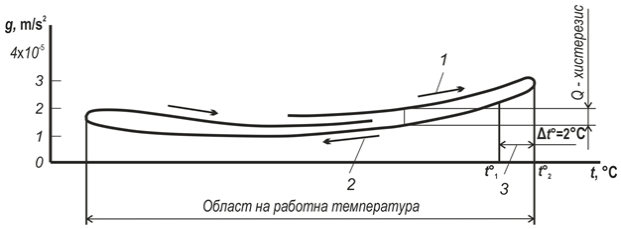
В миналото геофизиците са използвали отсечката от Селскостопанска академия в София до Драгалевския манастир за еталониране на гравиметри (Михайлов, 1989). Разликата в стойностите на силата на тежестта между гравиметричните точки на споменатата отсечка е определена с махален гравиметър. По-късно, след създаване на *Гравиметричната лаборатория в Бургас за ремонт на гравиметри,* там в района е създаден и гравиметричен полигон за еталониране на гравиметри. Еталонните стойности на "Δg" на полигона са измерени с гравиметри ГАГ-2 от руски специалисти /геофизици/. Лабораторията е създадена, за да се ремонтират счупените кварцови системи на гравиметрите. Монтирането на счупените кварцови системи ставаше от руски специалист и обучени наши специалисти в Русия. В лабораторията бяха ремонтирани и гравиметри от други страни, като Унгария, Чехия, Югославия и Северна Карея. Същата е снабдена с модерни термокамера и барокомера, а също и с вакуумпомпа за вакумиране на отремонтираните гравиметри. В лабораторията имаше и монтиран вибростенд, за да се изследват отремонтираните гравиметри на влиянието на вибрации /микросеизмика/. На вибростенда, гравиметърът е подложен на вибрации в продължение на 10 min, след което са взимани отчети по него в продължение на 20 min и е построяван график даден на фигура 1.



Фиг. 1. Отчети по скалата на гравиметъра в продължение на 20 min, след като 10 min преди това гравиметърът е подлаган на интензивни вибрации

Също така е използвана и специално пригодена наклономерна плоча /екзаминатор/ за еталониране на гравиметрите по метода на наклона, т.е. за определяне на техните мащабни коефициенти. В термокамерата са задавани различни температури на отремонтиран гравиметър и е строена графика на температурната характеристика на гравиметъра, дадена на фигура 2.

Извършено е еталониране при различни температури на гравиметрите върху наклономерната плоча /екзаминатора/. Средната грешка от получаване на мащабния коефициент на гравиметъра, при еталониране на екзаминатора, е $\pm 1.10^{-3}$ Gal. След това са проверявани гравиметрите и на еталонния полигон, за да се проверят мащабните коефициенти за влияние на микросеизмика от транспортирането им с кола и за влияние на различни фактори, като температура и налягане. За всеки отремонтиран гравиметър е издаван паспорт.



Фиг. 2. Графика на температурната характеристика на гравиметър

Изследване и еталониране на гравиметри за геодезически цели

Със започване измерването на Държавната гравиметрична мрежа на България от "Геопланпроект", гравиметрите отначало се еталонират на отсечката Селскостопанска академия – Драгалевски манастир (Михайлов, 1989), а след това от "Геопланпроект" е създаден полигон за еталониране на гравиметри, даден на фигура 3.

Фиг. 3. Полигон създаден от "Геопланпраект" за еталониране на гравиметри

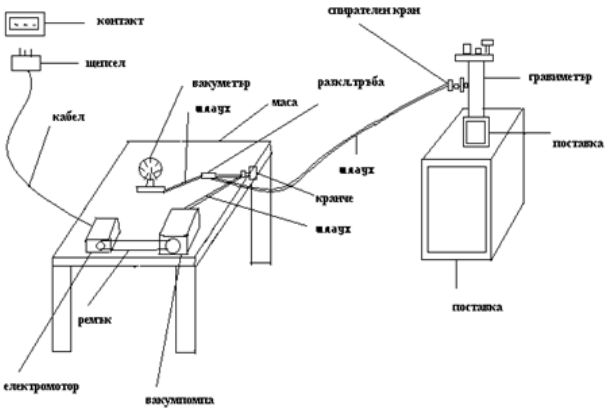
При измерването на Държавната гравиметрична мрежа, от "Геопланпроект" е извършено еталонирането на гравиметрите всеки месец на полигона и отсечката Селскостопанска академия – Драгалевски манастир (Михайлов, 1989). От РПГП град София е изработен специален екзаминатор за еталониране на гравиметрите по метода на наклона също от "Геопланпроект". Използваните гравиметри от вида ГАК и ГР/К2, са еталонирани на екзаминатора със средна грешка $\pm 1.10^{-2}$ – 1.10^{-3} Gal и след това са проверявани на отсечката Селскостопанска академия – Драгалевски манастир и на Софийския полигон.

След прехвърлянето на гравиметричните работи от "Геопланпроект" в "НИИГиФ", Софийският полигон се преизмерва от руски специалисти с гравиметри ГАГ-1 и ГАГ-2 и махални прибори ОВМ. С помощта на геодезическата служба на бившия СССР и геодезическите служби на Чехия, Унгария и Полша са създадени Еталонният гравиметричен полигон Видин – Мелник и Прецизните гравиметрични ходове. Полигонът е измерен с гравиметри ГАГ-1, ГАГ-2, Шарп, Уорден и Сцинтрекс, а ходовете са измерени с гравиметри ГАГ-1 и ГАГ-2 от руски специалисти. Интересен е фактът, че при измерването на полигона Видин – Мелник с различни гравиметри от различните страни са се получили разлики в отсечката Видин – Мелник до ±0,5 mGal (Михайлов, 1989). Като се има предвид, че всичките им прибори от вида Шарп, Уорден и Сцинтрекс са еталонирани по метода на наклона и проверени на Международния еталонен гравиметричен полигон, гравиметрите от вида ГАГ-1 и ГАГ-2, не се нуждаят от еталониране.

Какво прави впечатление, като се преглеждат и анализират данните от измерванията на полигоните с различна апаратура, през различно време и от различни специалисти? Налице са разлики, както е подчертано по-горе, от порядъка на ±0,5 mGal, независимо от това, че употребяваните гравиметри са еталонирани, както по метода на наклона, така и на полигон. Констатирано е, че инструменталното еталониране по метода на наклона не води до едни и същи резултати с това на полигона, обяснение, за което трябва да се търси (Михайлов, 2012). През 1983 – 1984г., е закупена руска установка за еталониране на гравиметри по метода на наклона УЕГП-1 № 95 от гравиметричната лаборатория в град Бургас, дадена на фигура 4.

Фиг. 4. Руска установка УЕГП-1№ 95 за еталониране на гравиметри по метода на наклона

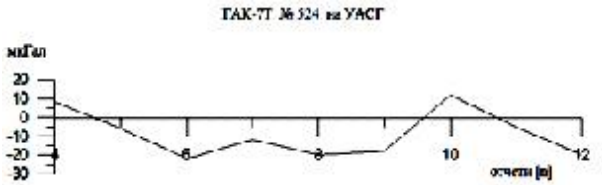
Също така е закупен и руски термостат ТЕГ за нея. По-късно беше изработена за нея и Система за контрол и регулиране температурата на гравиметър от Кораборемонтния завод във Варна (Михайлов и др. 1990). Същата се вижда от фигура 4, заедно с УЕГП-1 № 95 и поставен готов за еталониране гравиметър. Със тази Система за контрол и регулиране температурата на гравиметър се правеха температурни изпитания на гравиметрите на НИИГиФ (Tsenco et all., 2013). В НИИГиФ беше направена и вакуумпомпа за вакуумиране на гравиметрите преди еталонирането им по метода на наклона с УЕГП-1 № 95 (фиг. 5). По този начин в НИИГиФ беше създадена *Лаборатория за изследване и еталониране на гравиметри*.



Фиг. 5. Принципна схема на вакуумпомпа за вакуумиране на гравиметрите преди еталонирането им по метода на наклона с УЕГП-1 № 95

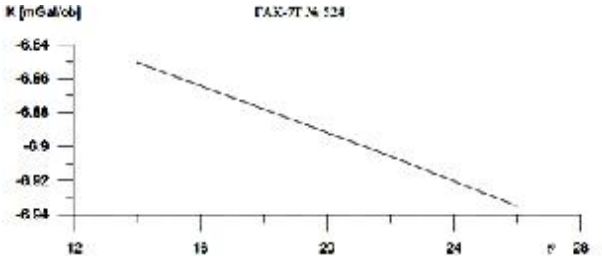
Грешката от определяне на еталонните значения на Δg, както на полигон, така и по–метода на наклона зависи от много фактори. При метода на наклона, грешката зависи от измерване ъгъла на наклона на изследвания гравиметър. Затова през всеки 2 години беше извършвано изследване на отчетното устройство на установката (Михайлов, 1993). Средната грешка от измерване ъгъла на наклона с установката се колебае около 0,23". Според предприятието производител, тази грешка трябва да варира от 0,10" до 0,40". От голямо количество изследвания и еталонирания на гравиметри в НИИГиФ на УЕГП-1 №95 (Михайлов, 1991), относителната грешка за определяне на мащабните коефициенти на гравиметрите в България е $\pm 1.10^{-4}$ Gal, т.е. еталонното значение на нарастването на силата на тежестта Δg, да е с точност ±10 μGal (Михайлов, 1993). На Видинския полигон, при еталонирането на гравиметри от Рукавишников и Михайлов беше получена относителна грешка от определяне на мащабните коефициенти от порядъка на $\pm 1.10^{-5}$ Gal, обаче с руската установка УЕГП-2 на ИФЗ АН СССР.

Грешката от определяне на Δg на еталонен полигон зависи от много фактори: от качеството на гравиметрите използвани за определяне на еталонните Δg на полигона, от правилно определяне на мащабния коефициент във физически единици, от влияние върху приборите на температура, вибрации, нелинейност на нулевата точка. От много изследвания и експериментирания се установи, че и по двата метода на еталониране могат да се получават почти еднакви резултани в рамките на точността за мащабните коефициенти. За целта температурите на еталониране и по двата метода да са еднакви и нелинейностите на отчетните скали да са в допустимите граници. Примерен график с нелинейности на скалата на гравиметър е даден на фигура 6.



Фиг. 6. График, показващ нелинейност на скалата на скалата на гравиметър

График с мащабните коефициенти на същия гравиметър, определени при три температури на УЕГП-1 № 95, е даден на фигура 7.



Фиг. 7. График с мащабните коефициенти на същия гравиметър, както на фигура 6, определени при три температури на УЕГП-1 № 95

В Таблица 1 са дадени мащабните коефициенти на гравиметри, еталонирани на полигон и по метода на наклона при еднакви температури (Михайлов и Бахчеванов, 1990).

Таблица 1.
Еталониране на гравиметри по различни методи

Гравиметър	Температура, при която е еталониран гравиметърът	К, определен по метода на полигона	К, определен по метода на наклона
ГАК-7Т № 689	14 C^0	K_{14}^0 =-6,3558	K_{14}^0 =-6,3562
ГР/К2 № 1514	15 C^0	K_{15}^0 =-5,9829	K_{15}^0 =-5,9833
ГАК-7Т № 524	18,5 C^0	$K_{18,5}^0$ =-6,8507	$K_{18,5}^0$=-6,8511

Заключение

Според някои автори (Войтенко, Минекес, 2007) основните причини, по които еталонните полигони са непригодни за точни определения на мащабните коефициенти на гравиметрите, са следните:

1/ На тях е невъзможно да се обезпечи технологически /температурен/ режим на еталониране, т.е. невъзможно е да се обезпечи постоянна температура на приборите в течение на целия период на еталонировъчните рейсове.

2/ Не е възможно на тях да се определи детайлно нелинейността на отчетните скали на гравиметрите.

3/ В измерените значения на Δg между точките от полигона, присъства псевдогравитационна съставяща, която е невъзможно да се отдели от гравитационния сигнал. Тя може да превиши инструменталната грешка на гравиметъра. Тази съставяща няма никакво отношение към гравитацията. Тя е предизвикана от въздействието на ендогенни микросеизмични вълни на чувствителната система на гравиметъра в момента на измерване.

След ликвидирането на гравиметричната лаборатория в гр. Бургас след 1989г. и след ликвидирането на лабораторията за изследване и еталониране на гравиметри в НИИГиФ края на 2003 г., единствен начин за еталониране на гравиметри в България остава полигоновият. Част от Софийския еталонен гравиметричен полигон и новосъздадената Калибровъчна линия на БАН София-Симеоново-Бистрица-Железница-Плана са измерени през 2004 и 2007г. с компютризирани гравиметри Scintrex CG-3 и Scintrex CG-5 от Белгийски специалист. За сега на тези отсечки става изследването и еталонирането на гравиметрите в България.

Литература

Войтенко, В. А., Р. Э. Миникес. Современные проблемы метрологического обеспечения статистических гравиметров. – *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2, т. 4, 2007. - 143-147.

Козякова, К. А., В. А. Романюк, Р. Б. Рукавишников и др. *Эталонирование гравиметров методом наклона*. М., Наука, 1979. - 206 с.

Михайлов, Е. Еталониране на гравиметри ГР/К2 и ГАК по метода на наклона. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 10, 1989. - 15-17.

Михайлов, Е. Методика за еталониране на гравиметри по метода на наклона на УЕГП-1 № 95, София – *ФНИТ „ГиФ“* (одобрена от Български институт по метрология за изследване на гравиметрите от системата на ГУГКК). 1991.

Михайлов, Е. Резултати от промяна мащабните коефициенти във времето на статичните кварцови гравиметри използвани в Република България. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 5-6, 2012. - 21-23.

Михайлов, Е., Бахчеванов, Д. Система за контрол и регулиране на температурата на гравиметър. – *Геодезия, картография, земеустройство*, 3, 1990.

Михайлов, Е., Р. Радичев. Гравиметрични измервания в България за периода от 1926 до 2011 година. – *Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“*, т. 54, св. I, Геол. геоф. 2011. - 145-151.

Tsenkov, T., E. Mihaylov. Study the dependence of the rate of division of quartz gravimeters the influence of temperature – *Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety*, Vol. 7, Part 4, 2013. - 86-93.

Статията е рецензирана от гл. ас. д-р Християн Цанков и е препоръчана за публикуване от кат. “Приложна геофизика”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", ТОМ 59, СВ. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geologyandgeophysics, 2016

ПРИЛОЖИМОСТ НА ЛЮБИТЕЛСКИ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМИ ЛЕТАТЕЛНИ СИСТЕМИ (ДУЛС) ЗА РЕШАВАНЕ НА ПРИЛОЖНИ ЗАДАЧИ

Християн Цанков, Иван Парушев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, ch.tzankov@gmail.com, parushev92@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Използването на ДУЛС за решаване на разнообразни приложни задачи е изключително ново направление, което се развива активно и следва да се утвърди и наложи при решаването на редица задачи, свързани с наблюдение и изследване на земната повърхност, както и с непосредствено протичащи процеси и явления. Едно типично приложение е възможността да се генерират детайлни цифрови модели на терена, което е от изключителна важност при планиране, проектиране и мониторинг на инженерни и др. мероприятия.
Новите технологии и изключителната популярност на дроновете допринасят за появата на сравнително евтини мултикоптерни системи. Комбинирани със стандартна камера с висока резолюция (или друг вид сензор), те се явяват мощно средство за дистанционни изследвания. Налице са и редица бюджетни софтуерни решения за допълнителна обработка на получената по време на летателните мисии информация.
В настоящата работа са разгледани тестови примери проведени с квадрокоптер Phantom 3 Professional (P3P) на DJI, представляващ напълно готова за полет интелигентна система, конструирана основно за любителски цели.

Ключови думи: Дистанционни методи, дронове, геофизика, фотограметрия, картография

APPLICATION OF NON-PROFESSIONAL REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS (RPAS) FOR SOLVING PRACTICAL PROBLEMS

Christian Tzankov, Ivan Parushev
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, ch.tzankov@gmail.com, parushev92@gmail.com

ABSTRACT. The use of RPAS for solving different practical problems is a new approach which is actively developed and should be enhanced and affirmed in solving number of problems related to monitoring and studying Earth's surface, as well as currently ongoing processes or phenomena. A typical application is the ability to generate detailed digital terrain models, which is critical in planning, design and monitoring of engineering and others activities.
The modern technologies and the increasing popularity of the drones contributed the emergence of relatively inexpensive multicopter systems. Combined with standard high-resolution camera (or different type of sensor) they are converting into powerful tool for remote sensing. Additionally, there are a number of budget software solutions for further processing the data gathered during the flight missions.
The current paper presents case studies conducted with DJI Phantom 3 Professional (P3P) quadcopter. The P3P is a fully ready to fly intelligent system designed primarily for non-professional purposes.

Keywords: Remote sensing, drones, geophysics, photogrammetry, cartography

Въведение

Многобройните възможности за приложение на мултикоптерните системи в практиката ги превръща в изключително полезен инструмент за решаване на разнообразни задачи в различни сфери на науката и практиката. Освен за практически и комерсиални цели, ДУЛС навлизат масово и като средство за лично ползване и забавление. Тези две направления имат сериозен принос за разработката и развитието на летателните апарати през последните години. От друга страна, намаляването на размерите, увеличаването на изчислителната мощ и поевтиняването на микроелектрониката са довели до бум на пазара на дронове след 2010г.

От геофизична гледна точка ДУЛС се използват за дистанционни измервания на земната повърхност. Това ги поставя в областта на дистанционните методи на изследване, в която попадат наблюденията на Земята с помощта на сателити или специализирани самолети и хеликоптери, но в различна и специфична ниша. Те могат да бъдат полезни за изследвания на малки височини (< 100 m), както и в трудно достъпни за друг вид летателна техника райони. Те са изключително подходящи за детайлни, локални и по-рядко регионални измервания. Разделителната способност на дрона зависи от техническите характеристики на използвания при наблюдението сензор, но в общия случай е по-висока от тази на сателитите и самолетите.

Едни от най-популярните приложения на ДУЛС са свързани с дистанционното заснемане на земната повърхност, както и със създаването на триизмерни теренни модели. Възможността за бърза, евтина и полуавтоматична реализация на тези задачи, без участие на пилот и специално обучен екип, дава значително предимство на ДУЛС.

Области на приложение

Най-общо, същността на дистанционните изследвания е в получаване информация за обекта, предмет на интерес, чрез измерване на негови характеристики от разстояние – без контакт с него, както и обработка на получената по този начин информация (Мардиросян, 2015). Съгласно това определение, комбинацията между сравнително евтините съвременни ДУЛС и стандартна камера с висока резолюция (или друг вид сензор) се явява мощно средство за дистанционни изследвания. Налице са и редица бюджетни софтуерни решения за допълнителна обработка на информацията.

Съвременните дронове са идеални за близко до земната повърхност картографиране при изключително високи нива на детайлност. Някои от най-важните области, в които снабдените със стандартна, спектрална или инфрачервена камера ДУЛС навлизат и се утвърждават все по-категорично са следните (Кисьов и Цанков, 2016):

- Строителство – мониторинг на процеса чрез периодично създаване на георефериранi орто-фото мозайки и цифрови повърхностни модели; изчисляване на обеми на насипи и изкопи; векторизиране и прехвърляне на данни към CAD и BIM софтуер и др.;
- Селско стопанство – мониторинг на растежа на посевите; определяне на растителния индекс NDVI, торене и др.;
- Минно дело – мониторинг на открития добив; наблюдение на отвали и насипища; изчисляване на обеми и изчертаване на контури; наблюдение на взривни полета и др.;
- Спешна помощ – бързи огледи при катастрофи; търсене на изгубени хора или жертви; спасителни мисии и др.;
- Изследване на рискови явления – наблюдение на свлачища; следене на наводнения; изследване на циклони и бури; пожари; вулкани и др.;
- Инспектиране на съоръжения – наблюдение и изследване състоянието на различни видове конструкции (сгради, покриви, мостове, язовирни стени, комини и др.); енергийна ефективност на сгради; изследване разположението и топлинните характеристики на соларни панели; инспектиране на електропроводи и тръбопроводи и др.;
- Въздушна фотограметрия – създаване на орто-фото мозайки и триизмерни модели; геодезични задачи; градско планиране; картографиране на обширни области; кадастър и др.;
- Мониторинг на околната среда – наблюдение на природни ресурси (гори, води и др.); изучаване местообитанията на видовете и тяхната миграция; геоложки наблюдения; наблюдение и мониторинг на замърсявания и др.;
- Недвижимо имущество – оглед на недвижимо имущество, околните сгради, имоти и инфраструктура; презентационни триизмерни модели на имоти и др.;
- Обучение.

В настоящата работа са представени накратко три примера, демонстриращи възможностите на любителска ДУЛС при решаване на разнообразни приложни задачи.

Технически характеристики на използваната любителска ДУЛС

По-нататък са разгледани три тестови примера, проведени с квадрокоптер Phantom 3 Professional (P3P) на DJI, представляващ напълно готова за полет интелигентна система, конструирана основно за любителски цели (фиг. 1). Използваният летателен апарат представлява квадрокоптер от среден клас. Гъвкавостта на управление, стабилността му във въздуха и вградената камера с висока резолюция окачена на триосна жироскопична стойка за стабилизация в реално време правят DJI P3P изключително подходящ инструмент за провеждане на разнообразни мисии свързани със заснемане, следене и картографиране.

Фиг. 1. DJI P3P по време на полет при тестово орто-фото заснемане

Техническите характеристики на използвания дрон са следните:

Квадрокоптер

- Тегло (с батерията и перките): 1280 g;
- Размер на диагонала (вкл. перките): 689 mm;
- Максимална скорост на издигане: 5 m/s;
- Максимална скорост на спускане: 3 m/s;
- Точност на зависване: вертикална - +/- 10cm хоризонтална - +/- 1 m;
- Максимална скорост: 16 m/s (ATTI режим, без вятър);
- Максимална надморска височина: 6000 m;
- Работна температура: от 0°C до 40°C;
- GPS режим: GPS/GLONASS.

Камера

- Сензор: Sony EXMOR 1/2.3” ефф. пикс.: 12.4 Mpx (абс. бр. пикс.: 12.76 M);
- Обектив: FOV 94° 20 mm (35 mm екв.) f/2.8, фокус в безкрайност;
- ISO: 100-3200 (видео) 100-1600 (фото);
- Скорост на затвора: 8 s -1/8000 s;
- Размер на изображенията: 4000 x 3000;
- Режими на снимане: единична снимка; серия: 3/5/7; авто-експозиция с брекетинг (AEB): 3/5; кадри с брекетинг и отклонение 0,7 eV; времеви серии;
- Режими на видеозапис: UHD: 4096x2160p 24/25, 3840x2160p 24/25/30; FHD: 1920x1080p 24/25/30/48/50/60; HD: 1280x720p 24/25/30/48/50/60;

- SD карта: Micro SD с максимален капацитет 64 GB (Class 10 или UHS-1);
- Максимален битрейт за видеото: 60 Mbps;
- Поддържани файлови формати: FAT32/exFAT; Фото: JPEG, DNG; Видео: MP4, MOV (MPEG-4 AVC/H.264);
- Работна температура: от 0°C до 40°C.

Гимбъл:

- Контролиран обхват: ъгъл на наклона: от -90° до +30°;
- Стабилизация: 3-осна (тангаж, крен, отклонение от курса).

Тестови примери

Представените обекти са изследвани с квадрокоптер DJI P3P през първата половина на 2016г. При всички примери заснеманията са извършени с максимална резолюция на изображенията 12 Mpx, презастъпване 80% и вертикален наклон на камерата -90°. Показаните аерофото карти и триизмерни модели са създадени след обработка със стандартни програми за автоматична триизмерна фотограметрия AgiSoft или Context Capture.

Обект „Дружба“

На 27.02.2016г. в района на кръстовището на бул. „Копенхаген“ и ул. „Обиколна“ в ж.к. Дружба 2 е проведено тестово орто-фото заснемане, съставено от две летателни мисии. Първата мисия е изпълнена при височина на полета 50 m над терена, а втората – при височина 40 m. В първия случай са заснети 49 ситуации по 6 успоредни профила, а във втория – 73 по 7 профила (фиг. 2).

Данните от двете мисии са обработени с програма за автоматична триизмерна фотограметрия Context Capture. За целта, изображенията са интегрирани в програмната среда, след което е извършена автоматизирана аеро-триангулация, въз основа на общи елементи (контролни точки). Направен е статистически анализ и е оценено средно квадратичното отклонение на модела от изходните изображения. Като резултат е генериран цифров модел на терена, въз основа на който е създадена аерофото карта и триизмерен теренен модел (фиг. 3).

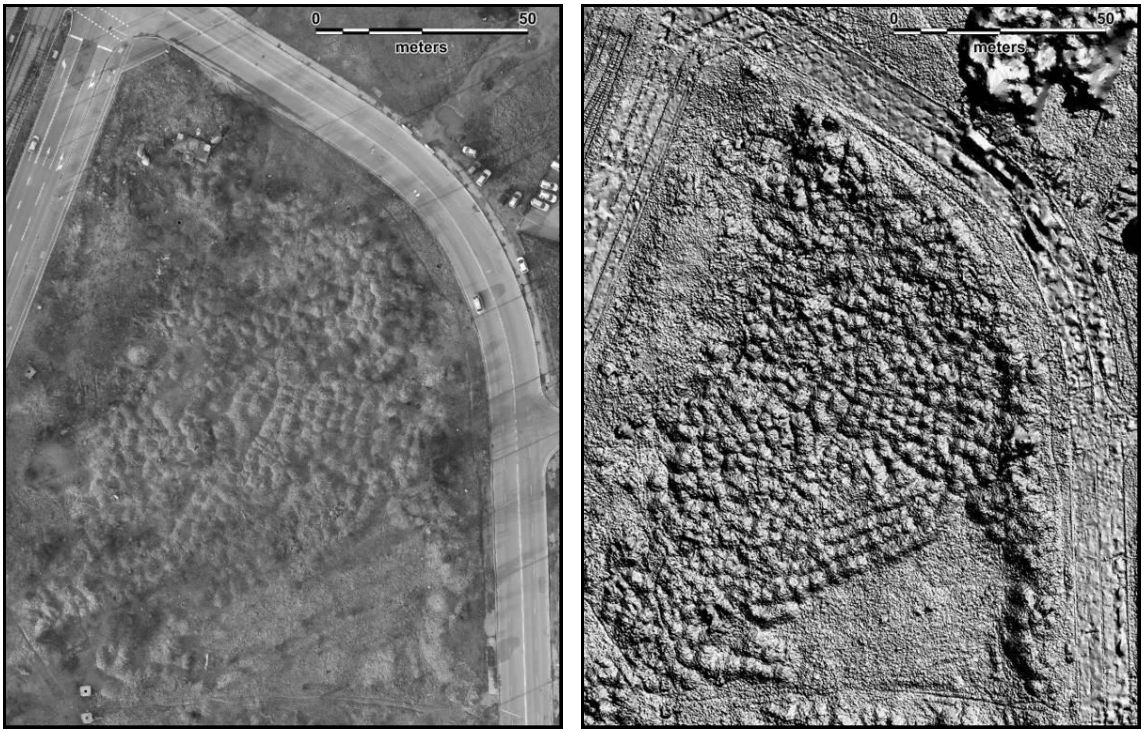
Аерофото картата се характеризира с изключително висока разделителна способност. Тя може да бъде използвана за: картографска основа, по която да бъдат отделени и векторизирани елементи от земната повърхност (пътища, шахти, дървета, стълбове и др.); извършване на геостатистически анализ на заснетия участък; планиране и проектиране на инженерни и др. мероприятия; следене и документиране развитието на дадена дейност (напр. строителство) и др.

След допълнителна диференциация на повърхностните обекти с помощта на аерофото картата (напр. разделяне на повърхностните нееднородности по типове), триизмерният теренен модел може да бъде използван за по-задълбочен геостатистически анализ. Освен това могат да бъдат изчислени приблизителните обеми на позитивни или негативни повърхностни форми. В конкретния случай моделът може да бъде използван като ориентир за мащаба на засипването на терена със строителни отпадъци. Забелязва се добре изразено структуриране на купчините в редици, което говори за организирано и мащабно депониране на отпадъците. Обемът на изхвърления материал също може да бъде изчислен, но за целта е необходимо при изчисленията да бъдат изключени позитивните форми, свързани с наличието на храсти и дървета, особено в северния и източния участък до пътя.

Обект „Кабиле“

Аерофото заснемането на терена е осъществено по време на десетдневна експедиция в средата на месец май, съгласно задача за издирване на археологически обекти с геофизични методи и въздушна фотография в района на НАР „Кабиле“, обл. Ямбол. Цялостното заснемане е осъществено чрез 10 летателни мисии. Първите седем мисии имат 1092 сцени и са изпълнени в началото на полевите работи. Те покриват по-голяма част от територията на НАР „Кабиле“, южния участък, площта, разположена източно от базата на археолозите и южните склонове на Зайчи връх. Височината на полетите е 50 m над изходната точка на мисиите. Последните три мисии (фиг. 4а) са изпълнени в края на експедицията и се състоят от 720 сцени. Две от тях обхващат източната територия на резервата при височина на полета 50 m, а третата при 100 m височина, покрива югозападния участък, включително и възвишението Зайчи връх. Именно, триизмерният модел създаден по данни от последните три мисии е представен в доклада (фиг. 4б).

Фиг. 2. План на мисиите от тестовото орто-фото заснемане при 50 m височина (вляво) и 40 m височина (вдясно)

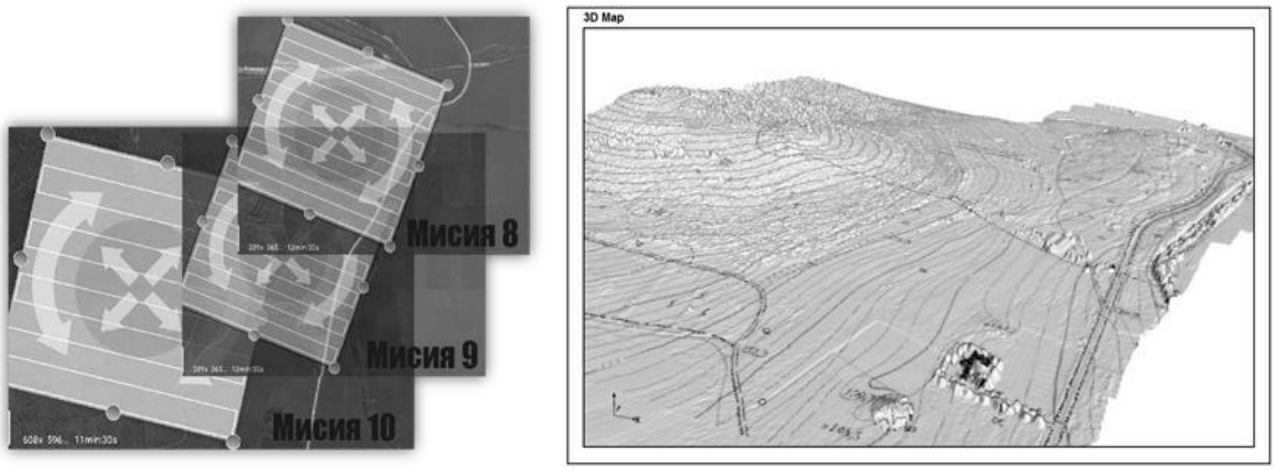


Фиг. 3. Орто-фото карта (вляво) и 3D модел на терена в района на обект „Дружба“ изграден чрез автоматизирана аеро-триангулация (дясно)

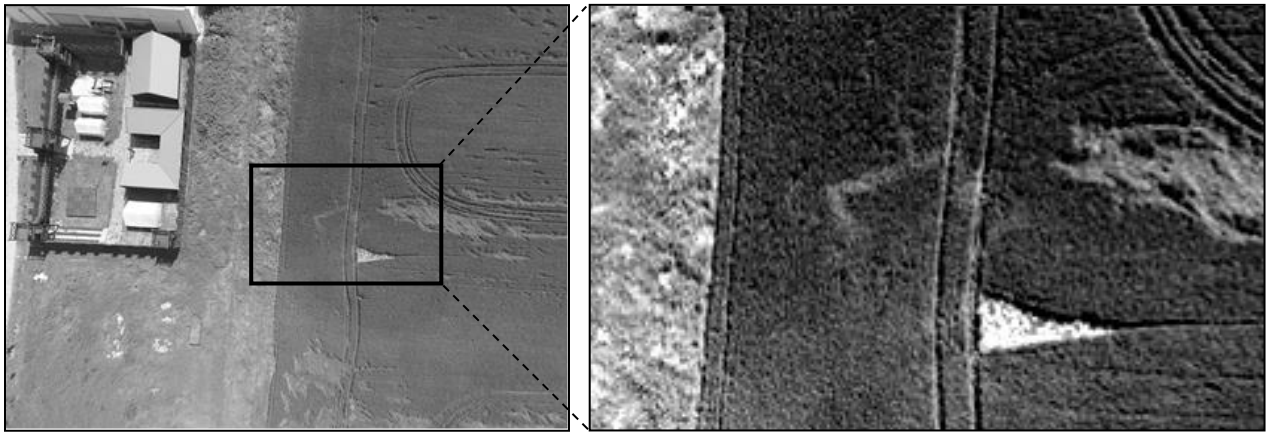
Допълнителен оглед на направените с дрона въздушни сцени, позволяват да бъдат набелязани някои подходящи за допълнителни изследвания площи. Така например, в нивите срещу южната граница на НАР „Кабиле“ е забелязан участък, в който промени в цвета на житото очертават правилна правоъгълна форма (фиг. 5). Тя може да бъде свързана с наличието на останки от структура с антропогенен характер, намираща се плитко под земната повърхност, с което оказва влияние върху развитието на посевите над нея. В няколко други сцени също са забелязани структурирани петна и оцветявания на почвата, които биха могли да бъдат от потенциален интерес при бъдещи археологически проучвания в района.

Обект „Ротондата“

В началото на месец юли във вътрешния двор между сградите на хотел Шератон и Президентството е извършено облитане на част от покривното пространство на северното крило на сградата на Президентството. Целта на изследването е търсене и локализиране на източника на теч, който се наблюдава на партера и нивото под вътрешния двор. Тъй като не са открити и предоставени подробни чертежи на сградата, а вертикалните улуци, отвеждащи водата от покрива на сградата, са скрити във фасадата, се наложи използването на дрон за определяне местата на водостоците от вътрешната страна на крилото.



Фиг. 4. План на припокриване на последните три летателни мисии от обект „Кабиле“ (ляво) с изглед от създадения триизмерен модел, с наложена върху него топографска карта в мащаб 1:5000 (дясно)



Фиг. 5. Въздушна снимка на участък южно от римския лагер в НАР „Кабиле“ (ляво) с увеличен и обработен фрагмент (дясно), на който ясно се наблюдават следи от правоъгълна структура, очертана от особености в растежа на житните насаждения

Летателната мисия е осъществена за изключително кратко време (около 10 min), при което е направено видео и фото заснемане на 60 метрова отсечка от ръба на покрива, представляваща интерес за реализацията на задачата.

Фиг. 6. Участък от покрива на северното крило на сградата на Президентството, с локализирани местата на два от водостоците

След преглед на получените материали са локализирани пет водостока, с което поставената пред квадрокоптера задача е решена.

Заключение

Представените кратки примери демонстрират уверено възможността за използване на дистанционно управляеми летателни системи от любителски клас за решаване на разнообразни по своята същност приложни задачи. Това е възможно, тъй като към настоящия момент са налице няколко основни фактора, водещи до създаването на висококачествени летателни системи на достъпни цени.

Първият основен фактор е наличието на добре развита технология за конструиране и управление на безпилотни мултикоптерни системи, в комбинация с относително лесно управление и техническа поддръжка. Относно опростените конструктивни решения и изисквания за безопасност, отсъствието на оператор на борда на летателната система е от съществен принос.

Друг важен фактор е значителното намаляване на цените на високотехнологичните летателни системи, което е повлияно от високия пазарен интерес, свързан с навлизането и използването на ДУЛС в най-разнообразни сфери на познанието. Съществен принос има и любителският интерес към дроновете. Ниските цени на апаратурата са в пряка връзка и с падащите цени на микроелектрониката и оптичната техника.

Приложимостта на любителските ДУЛС за решаване на най-разнообразни приложни задачи произтича и от факта, че тази област на заобикалящата ни среда и възможността да се погледне света през очите на птица, доскоро бе практически недостижима за масите. Безграничните възможности, които един компактен безпилотен летателен апарат, снабден с най-обикновена камера, предоставя, тепърва ще бъдат развивани и описвани.

С представеното дотук се подчертава потенциалната възможност за използване на бюджетни любителски квадрокоптери за решаване на приложни задачи. Това не изключва отсъствието на опит на оператора, както и използването на неизправни летателни и навигационни системи.

Разбира се, необходимостта от по-висока точност, контрол и време за полет при редица практически задачи обуславя използването на специализирани, високоточни ДУЛС. При различните специализирани задачи и в зависимост от целта на изследването, освен с камера с висока резолюция, дронът може да бъде снабден и с други видове сензори, като напр. инфрачервена камера, мулти-спектрална камера, радиационен спектрометър, магнито-метър, радио електро-магнитни сензори и др.

Литература

Кисьов, Ат., Хр. Цанков. Приложение на дистанционно управляеми летателни системи (ДУЛС) за дистанционни изследвания. - *Сборник с доклади: XIV Национална младежка научно-практическа конференция*, С. ФНТС, 2016. - 66-72.

Мардиросян, Г. *Основи на дистанционните аерокосмически технологии*. С., Изд. НБУ, 2015. - 240 с.

Марков, Е., Н. Димитров, Ив. Парушев. Обзор на възможните приложения на безпилотни летателни системи в геофизиката. - *Сборник с доклади: 7-ма Национална конференция по геофизика „Геофизика 2015“*, С., ДГБ, 2015. - S2-O5.

Статията е рецензирана от гл. ас. д-р Деница Василева и е препоръчана за публикуване от кат. “Приложна геофизика”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

ESTABLISHMENT THE IMPACT OF ANODIC TYPE ON THE PERFORMANCE OF MFC WITH H_2S AS A MEDIATOR

Katerina Nikolova, Anatoliy Angelov, Svetlana Bratkova, Petia Genova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Department of Engineering Geoecology, 1700 Sofia, nikolova_kat@yahoo.com

ABSTRACT. In order to establish the impact of the type of electrode in the anodic chamber of an MFC, based on microbial sulfate reduction, a series of laboratory experiments is performed with the same U-shaped design of the fuel element and identical experimental conditions. Each time the anodic surface area is the same. The cathode at the five variants is a graphite rod. It was found that the aluminium anode allows a transfer of a larger electron flow and the generation of higher maximum power density rates - more than three times higher than those obtained with the graphite. The lowest value of coulombic efficiency is that of the lead anode.

Keywords: Microbial Fuel Cell, Wastewater Treatment, Alternative energy

УСТАНОВЯВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ВИДА НА АНОДА ВЪРХУ РАБОТАТА НА МГК С МЕДИАТОР СЕРОВОДОРОД

Катерина Николова, Анатолий Ангелов, Светлана Браткова, Петя Генова
Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", катедра "Инженерна геоекология", 1700 София, nikolova_kat@yahoo.com

РЕЗЮМЕ. С цел установяване на влиянието на вида на електрода в анодната област на МГК, базирана на микробна сулфат редукция, е извършена серия от лабораторни опити с една и съща U-образна конструкция на горивния елемент и идентични условия за провеждане на експеримента. Площта на анода всеки път е еднаква. Катодът и при петте варианта е графитна пръчка. Установи се, че алуминиевият анод позволява трансферирането на по-голям електронен поток и генерирането на по-високи стойности на максималната плътност на мощността – над три пъти по-високи от тези, получени с графит. Най-ниската стойност на кулонова ефективност е при оловния анод.

Ключови думи: Микробна горивна клетка, пречистване на отпадъчни води, алтернативна енергия

Introduction

The long-term ensuring with cheap, accessible and eco-friendly energy and the complex answer to energetical and environmental problems is a prospective new strategy that can be summarized as a conversion of "energy for waste disposal" to "energy from waste". Mine and industrial wastewaters formed during mining and ore processing cause a serious impact on the environment. A common problem is the formation of acid mine waters with low pH and high concentrations of heavy metals and sulphates as a result of the exposure of fresh surface of the sulfide minerals to air and fluids. The sulfates are highly mobile and can migrate easily on large distances and in depths. These cases can lead to damages of ecosystems (Krishnakumar et al., 2005), with a number of negative effects on surface and groundwater basins (Johnson and Hallberg, 2005).

The idea of microbial fuel cells (MFCs) is relatively new - it provides the possibility of consideration of wastewater as a resource, not only for an economic and an environmental problem (Logan and Regan, 2006; Wang et al., 2012). MFCs enable the treatment of waste or wastewater with a simultaneous production of electricity through the vital activity of microorganisms.

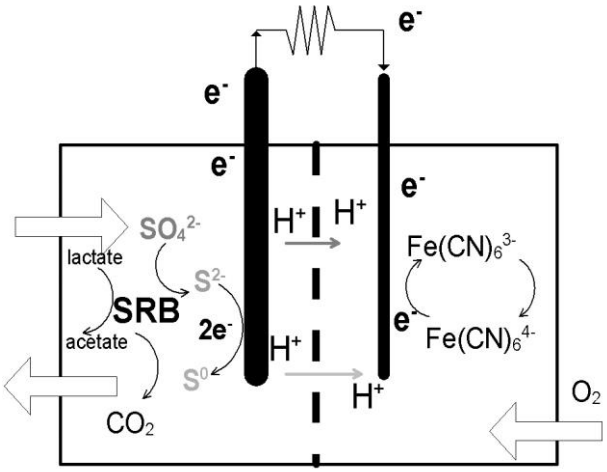


Fig. 1. A schematic diagram of MFC, based on the process of DMSR

…The MFCs, based on the process of dissimilatory microbial sulfate reduction (DMSR) in the anodic chamber (fig. 1), are capable of simultaneous removal of sulfate via sulfide (Angelov et al., 2013; Habermann and Pommer, 1991). The biogenic H_2S serves as a mediator and ease the electron transfer onto the anodic surface (Nikolova et al., 2013; Kleinjan et al., 2005; Ateya et al., 2003).

Materials and methods

Design of the laboratory scaled U-shaped MFC, based on the vital activity of sulfatereducing bacteria

The scope of the present article is to study the role of one of the main constructive and technological parameters, the anode, on the efficiency of MFC, based on the process of dissimilatory microbial sulfate reduction. It was found in previous studies that the anodic surface area has no significant impact on the generation of maximum power densites - they remain in the same range with the increase of the anodic surface. So the attention was focused on the material of anode, which determines its conductivity, adhesion, potential and respectively the electrochemical parameters of the fuel element.

For this purpose a series of laboratory tests is carried out with the same U-shaped design of the fuel element (Nikolova et al., 2015), presented at Figure 2, and identical conditions for the experiment. It should be borne in mind that the cathode each time remains the same (graphite rod with a surface area of 0.0024 m^2). The area of the anode is 0.0048 m^2 for each one of the experiments. The five various options of the anodes are presented at Table 1 and Figure 3. The electrochemical behavior of the MFC was observed with each one of the used anodes.

…The volume of the anodic and cathodic chambers of the MFC were of 0.48 dm^3. The volume of anodic section together with the buffer tank was 1.2 dm^3. To separate the two compartments was used a cationexchange membrane CMI-7000S. It was preferred in previous studies for its wear resistant properties and the attainment of high potentials.

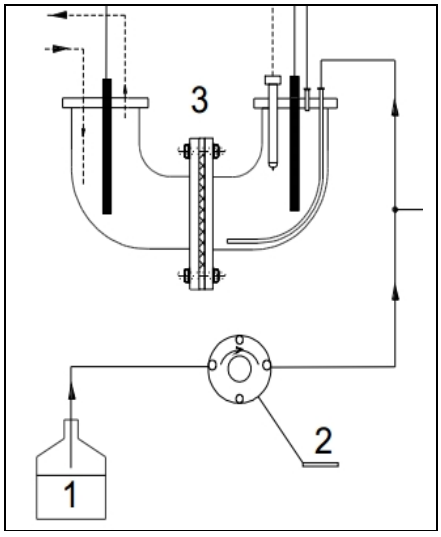


Fig. 2. Laboratory-scaled U-shaped MFC, based on the process of MDSR 1 - Feeding tank, 2 - Dosing peristaltic pump, 3 – MFC

…The catholyte in the cathodic chamber was a solution of 100 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ in 67 mM phosphate buffer with pH 7.0. The final electron acceptor was oxygen in air, which in reduction together with the protons located in cathodic space, formed water. The operation of the MFC was implemented under open air mode for the cathodic chamber.

The buffer tank to the anodic chamber was filled up with 0.3 kg clinoptilolite zeolite from "Beli plast" deposit with fraction size 2.5–5.0 mm. The particles were used as a carrier of the electroactive sulfatereducing biofilm. The elemental composition is given in Table 2. The zeolite was modified by saturation with NH_4Cl and KH_2PO_4 in course of the availability of the biogenic elements for the achievement of high sulfatereduction rates. The cation exchange capacity and the exchanged ions in meq/100 g were respectively: 112.75, K^+ – 33.88, Na^+ – 21.01, Ca^{2+} – 63.48, Mg^{2+} – 2.68.

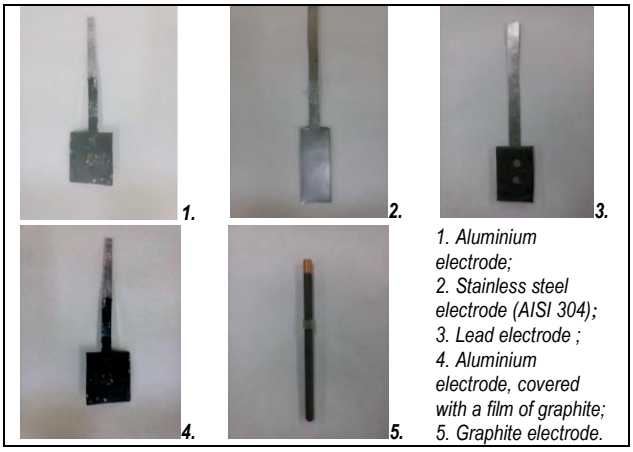


Fig. 3. Different variants of anodes of the MFC

Table 1.
Different variants of anodes used for different operational modes of the MFC

Variant	Type of anode - description
1	Aluminium electrode - type "plate"
2	Stainless steel electrode (AISI 304) - type "plate"
3	Lead electrode - type "plate"
4	Aluminium electrode, covered with a film of graphite - type "plate"
5	Graphite electrode - type "rod" (3 pcs.)

Table 2.
Elemental composition of the clinoptilolite used as a carrier of consortium of sulfatereducing bacteria and other microorganisms in the anodic chamber of MFC

Oxides	Percentage, wt %	Oxides	Percentage, wt %
SiO_2	67.96	Na_2O	0.74
Al_2O_3	11.23	CaO	3.01
Fe_2O_3	0.83	MgO	0.06
K_2O	2.85	TiO_2	0.90

The anodic chamber was inoculated with 50 ml mixed culture of sulfatereducing bacteria. Then MFC was feeding continuously with culture medium after biofilm formation. The adherence of the biofilm on the carrier took nearly 3 months. The formation of active biofilm was carried out through periodic replacement of 50% of the liquid phase of MFC with fresh medium. Replacement of the liquid phase was performed after sulfate concentration reduced below 0.2 g/l. In the end of this period it was started continuous feeding of the anaerobic reactor with a modified culture medium of Postgate.

Thus, two zones were formed in the U-shaped MFC: anodic one, where electroactive biofilm on zeolite derived electrons from organic substrates and produced H_2S and cathodic one, where the oxygen was the terminal electrons acceptor and reacted with the released protons.

During these series of laboratory investigations in the anodic area of the installation were treated with solutions containing high concentrations of organic compounds and sulfates - synthetic solutions (modified Postgate medium for sulfatereducing bacteria). The culture medium for SRB contained in g/dm^3: K_2HPO_4 - 0.5, NH_4Cl - 1.0, Na_2SO_4, anhydrous - 2.0, $CaCl_2$ - 0.1, $MgSO_4.7H_2O$ - 4.0, Na-lactate - 6.0, yeast extract - 0.25 and pH 6.5. The sulfates in the nutrient medium had a concentration of 3.0 g/dm^3, thus the proportion between organic carbon and the terminal electron acceptor was 0.67.

Electric parameters of MCF were monitored with a portable digital multimeter Keithley Model-175. A precise potentiometer with maximum value of 13.5 kΩ was used for measurement of the external resistances. For the establishment of the system electrochemical behavior was used a potentiostat - ACM 3 connected to PC for reporting and analysis of the accumulated data.

…Each experiment with a different anode proceeded 24 h. At the end of the cycle the electrochemical behavior of the element was observed. Then the anode was replaced with a new one. The ambient temperature was relatively constant - in the range of 21 – 22 ^oC.

Results and discussions

Regarding the behavior of the MFC major electrochemical parameters in Figures 4 and 5 is presented data on voltage drop and the dynamics of power density, summarizing the operation of the fuel cell with different load resistance (consumption), that ranges from 0 to 11 kΩ. The oxidation products accumulate on the anodic surface during continuous operation. Carbon materials are highly prevalent because of their developed surface area, providing space for the immobilization of electroactive microbial biofilm. Thereon respectively accumulates and elemental sulfur, produced by the oxidation of hydrogen sulphide on the anodic surface, and thus passivate the anodic surface.

…In this series of laboratory experiments it is found that the aluminium anode allows a transfer of larger electron flow and the generation of higher levels of maximum power density - more than three times higher than those, obtained with the graphite. The probable reason except the difference in electrode potentials is much weaker adhesion of sulfur formed on the surface of the electrode. The graphite film applied on the aluminium electrode is proved to be perishable, after 24 hours in the aquatic medium there are observed faults of the structure of the film. The monitored characteristics are observed in the 24th hour from the beginning of the experiment and the improvement of the performance of MFC is due to the free "fresh" surfaces of the aluminium base of the electrode.

The steel anode provides relatively high power density due to differences in electrode potential and higher values of the rate of the generated electricity at different resistances.

…For the variant with the lead electrode it should be taken into consideration its toxicity to organisms whose vital activity could be negatively affected or even inhibited by chronic use. At low and neutral pH values the lead, however, is practically insoluble. In an acidic medium, it is dissolved and oxidized, but quickly passivated by forming a thin oxide film that prevents it from its further oxidation. The formed oxide layer is the reason for the bad behavior of microbial fuel cell in the variant with the lead anode.

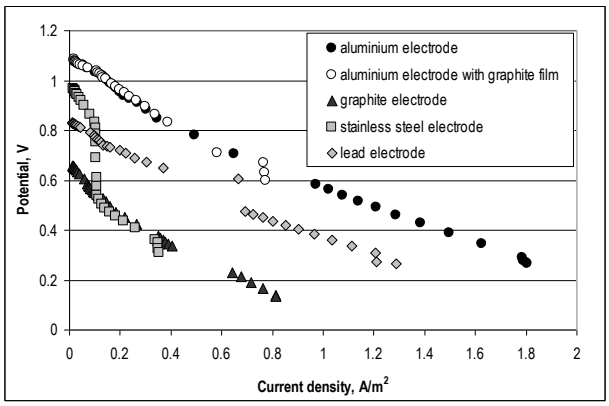


Fig. 4. Potential drops with different electrodes of U-shaped MFC, based on the process of DMSR

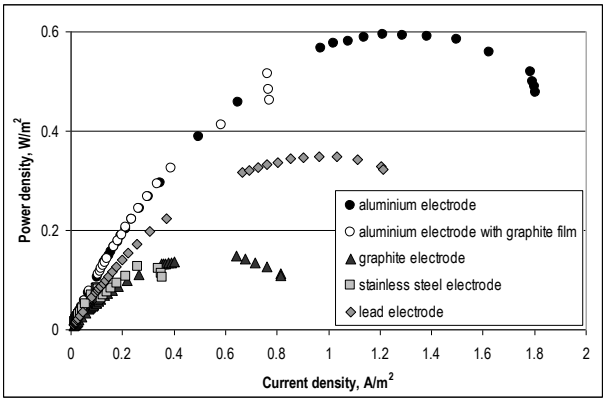


Fig. 5. Dynamics of power densities with different electrodes of U-shaped MFC, based on the process of DMSR

These conclusions are confirmed by the calculated values of coulombic efficiency for all variants with different anodes, presented at Table 3 and Figure 6.

The chemical oxygen demand (COD) removal rates are calculated using the equation 1.

$$€_{COD} = [(€_0 - €_t)/ €_0].100, \% \quad (1)$$

where: $€_0$ is the initial value of COD (mgO_2/L);
$€_t$ is the COD at any time (mgO_2/L).

Table 3.
Percentages of COD removal rates in the anodic chamber and of coulombic efficiencies for U-shaped MFC, based on the process of DMSR, with different types of electrodes

Anode	$€_{cb}$, %	$€_{COD}$, %
aluminium electrode	77.18	20.90
aluminium electrode with graphite film	77.27	20.86
graphite electrode	50.35	20.86
stainless steel electrode	61.64	21.79
lead electrode	45.30	21.43

For continuous flow through the system, the Coulombic efficiency is calculated on the basis of current generated under steady conditions (equation 2).

$$€_{Cb} = [M.I/ (F.b.q.\Delta COD)].100, \% \quad (2)$$

where: M = 32 is the molecular weight of oxygen;
F is Faraday's constant;
b = 4 is the number of electrons exchanged per mole of oxygen, q is the volumetric influent flow rate;
ΔCOD is the difference in the influent and effluent COD.

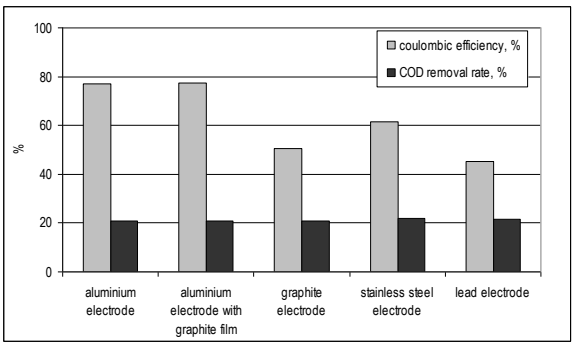


Fig. 6. COD removal rates in the anodic chamber and coulombic efficiencies of U-shaped MFC, based on the process of DMSR, with different types of electrodes

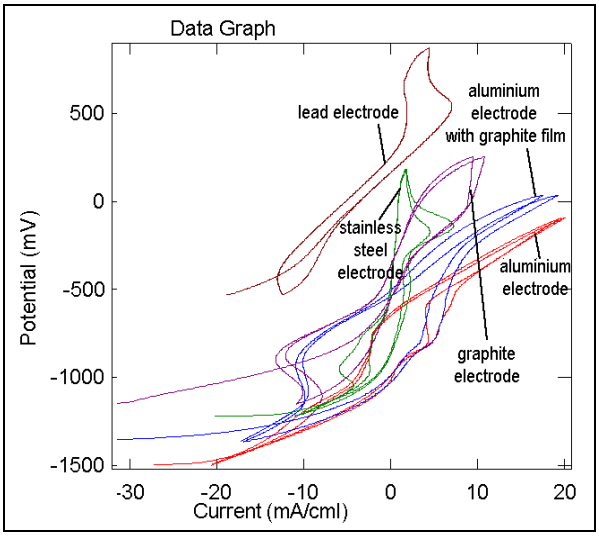


Fig. 7. CVAs of U-shaped MFC, based on the process of DMSR with different types of electrodes

…The shapes of CVAs for the two variants with aluminium electrodes (with or without graphite film) are identical (fig. 7). The difference in the hysteresis for the other three variants (fig. 7) and the reduction of voltage ranges are probably as results of different electrode potentials and prevalence of various Red-Ox processes in the anodic chamber.

Conclusions

The aluminium and the aluminium covered with graphite anodes give the best results - 77% of coulombic efficiemcy. Aluminium allows the transfer of larger electron flow and the generation of higher levels of maximum power density - more than three times higher than those obtained with the graphite. The probable reason except the difference in electrode potentials is much weaker adhesion of sulfur formed on the surface of the electrode.The lowest calculated rates of this parameter are for the lead anode, due to its passivation with oxide film. There is a necessity of further study of the potential for use of aluminium anodes in MFCs to replace more preferred graphite products.

Refferences

Angelov, A., S. Bratkova, A. Loukanov. Microbial fuel cell based on electroactive sulfate-reducing biofilm. - *Energy Conversion and Management, Vol.67*, ISSN: 0196-8904, 2013. - 283-286.

Ateya, B. G., F. M. AlKharafi, A. S. Al-Azab. Electrodeposition of sulfur from sulfide contaminated brines. - *Electrochem. Solid-State Lett. 6,* 2003. - 137-140.

Habermann, W., E.-H. Pommer. Biological fuel cells with sulphide storage capacity. - *Appl. Microbiol. Biotechnol. 35,* 1991, - 128-133.

Johnson, D.B. and K.B. Hallberg. Acid mine drainage remediation options: a review. - *Science of the Total Environment, 338,* 2005. - 3-14.

Kleinjan, W. E., A. de Keizer, A. J. H. Janssen. Kinetics of the reaction between dissolved sodium sulfide and biologically produced sulfur. - *Ind. Eng. Chem. Res. 44,* 2005. - 309-317.

Krishnakumar, B., S. Majumdar, V.B. Manilal, A. Haridas. Treatment of sulphide containing wastewater with sulphur recovery in a novel reverse fluidized loop reactor (RFLR). - *Water Res., 39,* 2005. - 639–647.

Logan, B. E., J. M. Regan. Microbial fuel cells-challenges and applications. - *Environ. Sci. Technol., 40*, 2006. - 5172-5180.

Nikolova, K., A. Angelov, S. Bratkova and P. Genova., Influence of various factors on the efficiency of MFC based on the process of microbial dissimilatory sulfate-reduction. - *"Confereng 2013", Tg-Jiu, Romania.* 2013 – 105-110.

Nikolova, K., A. Angelov, Sv. Bratkova, A. Stefanova. Impact of different types of separators on the efficiency of a dual-chambered MFC. - *Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски, Том 58, Св. II*, 2015. - 140-143.

Wang Z., X. Mei, J. Ma and Z. Wu. Recent advances in microbial fuel cells integrated with sludge treatment. - *Chemical Engineering & Technology, 35, № 10*, 2012. - 1733–1743.

The article is reviewed by Prof. Dr. Yoncho Pelovski and recommended for publication by the Department of Engineering Geoecology.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

IDENTIFICATION OF EXPOSED ROCKS IN OPEN PIT MINES USING INFRARED SPECTRAL DATA

Denitsa Borisova[1], Banush Banushev[2], Hristo Nikolov[1], Doyno Petkov[1]

[1]Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences /SRTI-BAS/, 1113 Sofia; dborisova@stil.bas.bg
[2]University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; banushev@mgu.bg

ABSTRACT. In this study satellite data from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) in the wavelength range (1.6-2.5 μm) of bare rocks and soils in the region of open pit mines "Elshitsa" and "Tsar Asen" in Bulgaria were used. The spectral reflectance of exposed rocks was compared with the spectral reflectance of the same rocks taken from different spectral libraries. The analysis of the spectral characteristics in the specified range indicates maintain their specific features. In the obtained curves were observed distinctive extrema that be able to be used to identify the type of rocks. The results show that the suggested methods for analyzing the spectral data could be used to identify exposed rocks. Theoretical and analytical techniques that have been developed for the analysis of the laboratory spectral data also could be applied to field spectral data.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА СКАЛИ В ОТКРИТИ МИНИ ПО ИНФРАЧЕРВЕНИ СПЕКТРАЛНИ ДАННИ

Деница Борисова[1], Бануш Банушев[2], Христо Николов[1], Дойно Петков[1]
[1]Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките, 1113 София; dborisova@stil.bas.bg
[2]Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; banushev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В настоящата работа са използвани спътникови данни от инструмента ASTER в каналите в спектралния диапазон (1.6-2.5 μm) за открити скали и почви в района на мините „Елшица" и „Цар Асен" в България. Спектралната отражателна способност на скалите е сравнена със спектралната отражателна способност на същите скали, взета от различни спектрални библиотеки. Анализът на получените спектрални характеристики в посочения диапазон показва запазване на техните специфични особености. На получените графики се наблюдават характерни екстремуми, които могат да бъдат използвани за идентифициране на вида на скалите. Резултатите показват, че предложените методи за анализ на спектралните данни могат да се използват за идентифициране на скални разкрития. Методите, които са разработени за анализ на спектралните лабораторни данни могат да бъдат приложени и за полеви спектрални данни.

Introduction

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. Remote sensing a useful method to monitor open pit mines in different scales. In this study satellite data from ASTER instrument channels in the wavelength range (1.6-2.5 μm) of exposed rocks in the region of abandoned open pit mines "Elshitsa" and "Tsar Asen" in Bulgaria were used. The spectral reflectance of exposed rocks was compared with the reference spectral reflectance of the same rocks taken from different spectral libraries (ASTER, USGS and JPL). The analysis of the spectra in the specified range indicates maintain their specific features. In the obtained curves were observed distinctive extrema that be able to be used to identify the type of rocks. The results show that the suggested methods for analyzing the spectral data could be used to identify exposed rocks. Theoretical and analytical techniques that have been developed for the analysis of the laboratory spectral data also could be applied to the field spectral data.

Materials and Methods

ASTER Instrument

The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) is an imaging instrument onboard Terra, the satellite of NASA's Earth Observing System (EOS) launched in December 1999. ASTER is a cooperative effort between NASA, Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), and Japan Space Systems (J-spacesystems). ASTER data is used to create detailed maps of land surface temperature, reflectance, and elevation. The coordinated system of EOS satellites, including Terra, is a major component of NASA's Science Mission Directorate and the Earth Science Division. The goal of NASA Earth Science is to develop a scientific understanding of the Earth as an integrated system, its response to change, and to better predict variability and trends in climate, weather, and natural hazards (http://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp, June 2016).

The ASTER instrument consists of three separate instrument subsystems. Each subsystem operates in a different spectral region, has its own telescope(s), and was built by a different Japanese company.

ASTER's three subsystems are: the Visible and Near Infrared (VNIR), the Shortwave Infrared (SWIR), and the Thermal Infrared (TIR). In our study were used data from subsystem in SWIR region.

ASTER Instrument Subsystem SWIR

The SWIR subsystem (fig. 1) operates in six spectral bands in the near-IR region through a single, nadir-pointing telescope that provides 30 m resolution. Cross-track pointing (± 8.550) is accomplished by a pointing mirror. Because of the size of the detector/filter combination, the detectors must be widely spaced, causing a parallax error of about 0.5 pixels per 900 m of elevation. This error is correctable if elevation data, such as a DEM, are available. Two on-board halogen lamps are used for calibration in a manner similar to that used for the VNIR subsystem, however, the pointing mirror must turn to see the calibration source. The maximum data rate is 23 Mbps (http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp, June 2016).

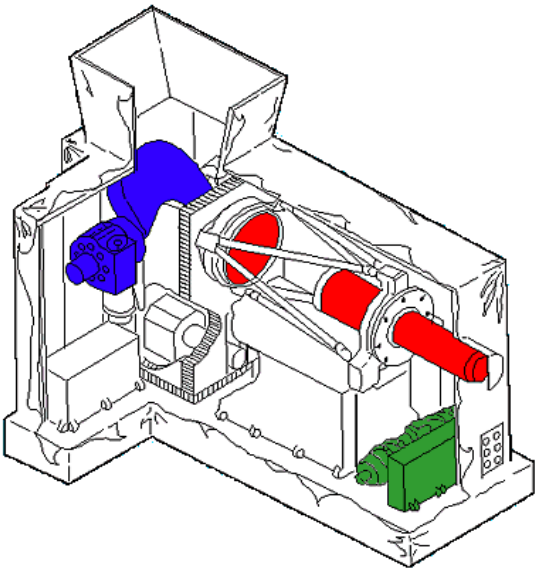


Fig. 1. ASTER Instrument Subsystem SWIR (http://asterweb.jpl.nasa.gov/swir.asp, June 2016)

ASTER Instrument Characteristics

The main characteristics of ASTER instrument are presented in Table 1 (http://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp, June 2016).

Table 1.
ASTER Instrument Characteristics

No	Characteristic	SWIR
Ch1	Spectral Range	Band 4: 1.600 - 1.700 µm
Ch2		Band 5: 2.145 - 2.185 µm
Ch3		Band 6: 2.185 - 2.225 µm
Ch4		Band 7: 2.235 - 2.285 µm
Ch5		Band 8: 2.295 - 2.365 µm
Ch6		Band 9: 2.360 - 2.430 µm
	Ground Resolution	30 m
	Data Rate (Mbits/sec)	23

The ASTER bands are superimposed on model atmosphere presented on Figure 2.

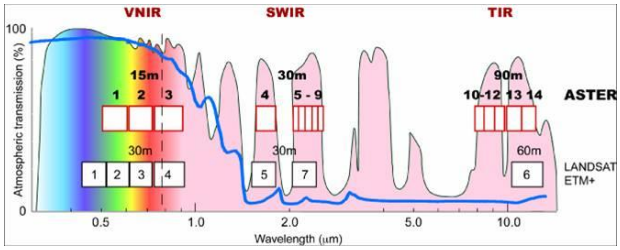


Fig. 2. ASTER bands (http://asterweb.jpl.nasa.gov/images/spectrum.jpg, June 2016)

ASTER Spectral Library

The ASTER spectral library includes data from three other spectral libraries: the Johns Hopkins University (JHU) Spectral Library, the Jet Propulsion Laboratory (JPL) Spectral Library, and the United States Geological Survey (USGS - Reston) Spectral Library.

In the present study we used data from the ASTER spectral library for comparing the obtained infrared spectral data from ASTER instrument onboard of the airborne platform and the same data from laboratory measurements for the same rock samples included in the spectral libraries (Baldridge et al., 2009).

Region of Interest (RoI)

In the present study the RoI is the Panagyurishte ore region. The Panagyurishte ore region (fig. 3) is located in the Central Sredna Gora and partly in the Stara Planina mountains in Bulgaria.

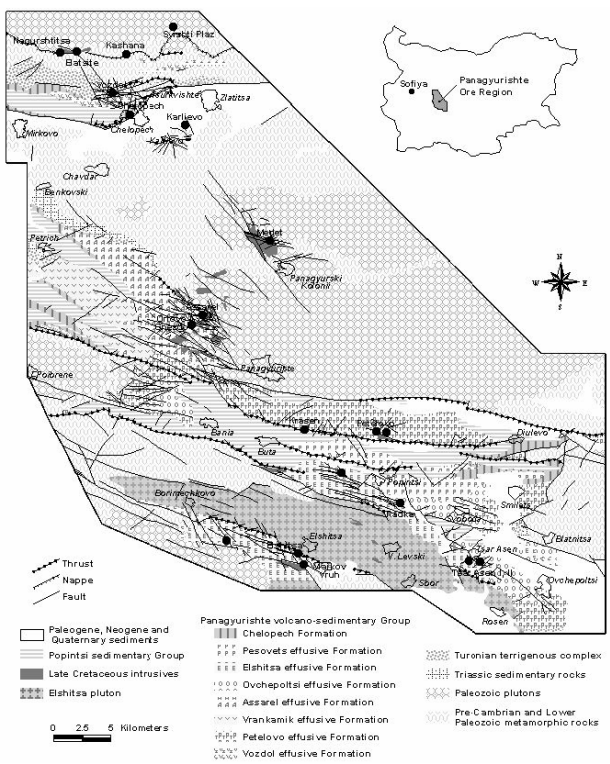


Fig. 3. Geological map of the Panagyurishte ore region (Popov, 2005)

The Upper Cretaceous Elshitsa volcano-intrusive complex comprises the rocks of Elshitsa stratovolcano, the Elshitsa pluton as well as numerous subvolcanic and subvolcanic-hypabyssal minor intrusives and dikes. The ore district is a

stripe-like area of East-South-East direction, about 20 km long and 4 km wide in the northern slope of the Elshitsa stratovolcano. The Elshitsa pluton is exposed along the southern border as a result of fault uplift of the central block of the volcano (Попов, 2002).

Our study is focused on abandoned open pit mine "Elshitsa" and Elshitsa pluton. This pluton is formed by granite, granodiorite and their porphyritic varieties (Lilov and Chipchakova, 1999).

Results and Discussion

Reference spectra

Reference spectra of granites were obtained from the USGS and JPL spectral libraries (Clark et al., 2007). The USGS spectral library contains reference spectra for rocks and soils that represent different localities around the world but most of them are presented in one particle size (Clark et al., 2007).

Spectral analysis

According specific features of the spectral curves the USGS and JPL reference spectra of granite were analyzed. The infrared spectra of granite have increased water vapor, which causes a noticeable sawtooth appearance in the short wavelength region of the spectra (2–3 μm).

Results show that it has an absorption feature around 1.9, μm (fig. 4). The 1.9 μm feature is obscured by atmospheric (water) absorption (Curran et al., 2001). This minimum in the spectral characteristics can be found in laboratory spectral data because of the more energy reaching the instrument detector.

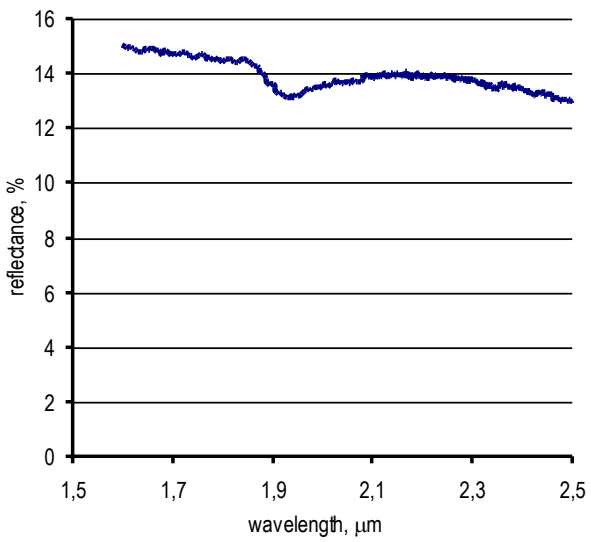


Fig. 4. Plot showing ASTER spectra of granite (Baldridge et al., 2009)

The ASTER spectra of exposed granites in "Elshitsa" open pit mine (green line in Fig. 5) have the same trend as reference spectra from the spectral library. The missing spectral data because there are no detectors in the spectral range (1.8-2.1 μm) could be cause for misinterpretation of the infrared spectral data. Therefore additional laboratory and field spectrometric measurements in this spectral range have to be planned and performed.

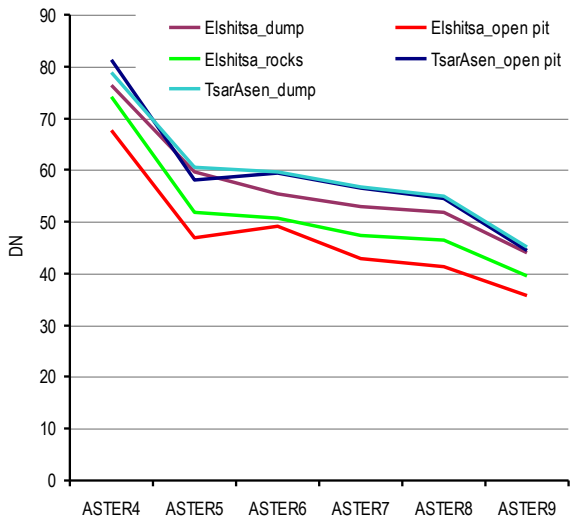


Fig. 5. Plot showing ASTER spectra of open pit mines "Elshitsa" and "Tsar Asen", their dumps and exposed rocks.

In Table 2 the statistics for used in the study data is shown.

Table 2.
Histogram summary table for ASTER data in RoI

No	Data Range	Mean	Median	St. Dev.
Ch1	0-255	38.5	51	36.2
Ch2	0-255	27.9	34	27.8
Ch3	0-255	29.6	34	30.0
Ch4	0-255	26.3	30	27.1
Ch5	0-255	25.8	28	27.4
Ch6	0-255	22.4	26	23.3

Conclusions

In this study were used multispectral data of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data to identify exposed rocks in the "Elshitsa" and "Tsar Asen" open pit mines in Bulgaria. The results show that the suggested methods for analyzing the spectral data could be useful to identify exposed rocks. Theoretical and analytical techniques that have been developed for the analysis of the laboratory spectral data also could be applied to field spectral data. For future work, this study suggests that collecting field reflectance spectra of the different exposed rocks and laboratory spectral measurements of the field samples. The collected spectra could be used for ASTER image classification and compare the results with the reference spectra of the USGS and JPL spectral libraries.

References

Попов, К. Геохимични асоциации в Радкинското рудно поле. – *Год. на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски", 45, Св. I: Геология и геофизика*, 2002. – 55-62.

Baldridge, A. M., S.J. Hook, C.I. Grove and G. Rivera. The ASTER Spectral Library Version 2.0. – *Remote Sensing of Environment, 113*, 2009. – 711-715.

Clark, R.N., G.A. Swayze, R. Wise, E. Livo, T. Hoefen, R. Kokaly, S.J. Sutley. USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey. *Digit. Data Ser. 231,* 2007.

Curran, P.J., J.L. Dungan, D.L. Peterson. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clark methodologies. - *Remote Sens. Environ. 76*, 2001. – 349-359.

Lilov, P., S. Chipchakova. K-Ar dating of the Upper Cretaceous magmatic rocks and hydrothermal metasomatic rocks from the Central Srednogorie. – *Geochem., Mineral. and Petrol., 36*, 1999. – 77-91.

Popov, K. Lithostratigraphy of the Late Cretaceous rocks in the Panagyurishte ore region. - *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 48, Part I: Geology and Geophysics*, 2005. – 101-114.

http://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp

http://asterweb.jpl.nasa.gov/images/spectrum.jpg

http://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp

http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp

http://asterweb.jpl.nasa.gov/swir.asp

The article is reviewed by Assist. Prof. Dr. Christian Tzankov and recommended for publication by the Department „Applied Geophysics".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

SPECTROMETRIC MEASUREMENTS OF REFLECTED RADIATION IN ECOLOGY RESEARCH

Kalinka Velichkova[1], Dora Krezhova[2], Svetla Maneva[3]

[1] University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, k.velichkova@mgu.bg
[2] Space Research and Technology Institute, Bulgarian academy of sciences, 1113 Sofia, dkrezhova@stil.bas.bg
[3] Institute of Soil science, Agrotechnology and Plant protection, Bulgarian Agricultural Academy, 1080 Sofia, svenma@abv.bg

ABSTRACT. In recent years, remote sensing proved to be very effective for ecological and conservation biological applications. Spectral remote sensing generates a remarkable array of ecologically valuable measurements for detecting natural and human-induced changes in the terrestrial ecosystems. In this study hyperspectral remote sensing method based on reflectance measurements in the visible and near infrared spectral ranges was applied for assessing the influence of some adverse natural changes in the environment (enhanced UV-B radiation and acid rain) on the physiological state of deciduous trees (species *Paulownia tomentosa*). Reflected radiation from the leaves was recorded on the seventh and fourteenth days after the adverse treatments by means of a portable fiber-optics spectrometer in the spectral range 350-1100 nm with a spectral resolution of 1.5 nm. Statistical and first derivative analyses and five narrow-band vegetation indices (mNDVI – modified Normalized Difference Vegetation Index, f_D - Disease index, SR –Simple Ratio, PRI – Photochemical Reflectance Index, TCARI - Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index) were used to evaluate the changes in the spectral reflectance of the investigated tree groups. Indices mNDVI and SR performed best for discrimination between different treatments. Shift of the first derivative maxima on the reflected spectra to the lower wavelenghts was observed for all treatments which indicated the presence of the changes in the physiological state of the paulownia trees against the control.

Keywords: Remote sensing, hyperspectral leaf reflectance, vegetation indices, ecology

СПЕКТРОМЕТРИЧНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА ОТРАЗЕНА РАДИАЦИЯ ЗА ЦЕЛИТЕ НА ЕКОЛОГИЯТА

Калинка Величкова[1], Дора Крежова[2], Светла Манева[3]
[1] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, k.velichkova@mgu.bg
[2] Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките, 1113 София, dkrezhova@stil.bas.bg
[3] Институт по почвознание, агротехнологии и защита на растенията, Българска селскостопанска академия, 1080 София, svenma@abv.bg

РЕЗЮМЕ. През последните години се оказа, че дистанционните изследвания са много ефективни за екологични и природозащитни биологични приложения. Спектралните дистанционни изследвания генерират изключително разнообразие от екологично ценни измервания за откриване на природни и предизвикани от човека промени в земните екосистеми. В това проучване хиперспектрален метод за дистанционни изследвания, основан на измерване на отразена радиация във видимата и близката инфрачервена спектрални области, е приложен за изследване на влиянието на някои неблагоприятни природни промени в околната среда (повишена UV-B радиация и киселинен дъжд) върху физиологичното състояние на широколистни дървета (вид *Paulownia tomentosa*). Отразената от листата радиация е регистрирана с портативен спектрометър с гъвкав световод в спектралния диапазон 350 -1100 nm със спектрална разделителна способност 1.5 nm. Статистически анализ, анализ на първа производна и пет теснолентови вегетационни индекси (mNDVI, f_D, SR, PRI, TCARI) са използвани за оценка на измененията в отразената от изследваните групи дървета радиация. Най-добри резултати за разграничаване на различните третирания по спектрални данни дават вегетационните индекси mNDVI and SR. Установено е отместване на максимумите на първите производни на отражателните спекри към по-ниските дължини на вълните за всички третирания, което е индикатор за настъпили изменения във физиологичното състояние на растенията, спрямо това на контролните.

Ключови думи: Дистанционни изследвания, хиперспектрална отразена радиация, вегетационни индекси, екология

Introduction

In recent years, remote sensing (RS) proved to be very effective for ecological and conservation biological applications. The efforts to predict the consequences of ecosystem function changes, both natural and human induced, on the regional and global distributions and abundance of species should be a high research priority. Further, the available RS tools and analysis techniques are ever evolving, and new capabilities continue to emerge, including sensors with improved spatial and spectral resolution (Medina et al., 2013; Rumpf et al., 2010). But the potential contribution of RS to study ecology in general, wildlife and more specifically ecosystem management, has yet to be realized.

RS generates a remarkable array of ecologically valuable measurements, which includes the details of habitats (land cover classification) and their biophysical properties (integrated ecosystem measurements) as well as the capacity to detect natural and human-induced changes within and across landscapes (change detection) (Wang et al., 2010).

The importance of environmental protection, climatic change, and nature preservation called for an intensive research of vegetation cover on global and regional scale by spectral remote sensing methods (Kerr and Ostrovsky, 2003). Monitoring of vegetation is essential for understanding dynamic biosphere processes. These are, to a large extent, formed by global photosynthetic energy transformation, which includes carbon dioxide assimilation and oxygen release by vegetation, and plays a role in maintaining the water balance (Veroustraete et al., 2002; Govender et al., 2009).

The reflectance spectrometry is a rapidly developing new branch of RS and field technologies covering the acquisition of reflectance spectra in the optical wavelength range of 0.4-2.5 µm, their processing and interpretation, which are, thus, suitable for investigation of the spectral behaviour of natural resources, such as soil, natural vegetation cover, waters, etc., (Aggarwal, 2008; Usha and Bhupinder, 2013). Spectrometry is based on the principle that molecules have specific frequencies at which they rotate or vibrate correspondingly with discrete energy levels (Myneni and Ross, 1991). Hence, depending on its molecular components, different materials will present essentially different spectral behaviour. The whole set of absorption features in the wavelength range constitutes a spectral pattern or so-called "spectral signature" of the materials.

Because of the importance of photosynthetic function, leaf optical properties have been the subject of hundreds of studies since the middle of the last century. Most papers focused on the spectral properties of leaves (reflectance and transmittance) which were used to estimate their biochemical content (Chl - chlorophyll, water, dry matter, etc.) and their anatomical structure (Carter and Spiering, 2002). Many other studies explore hyperspectral data applications in agriculture, environment, forestry and ecology (Krezhova, 2011; Usha and Bhupinder, 2013).

Over the past decade, researchers have studied also various spectral vegetation indices (SVIs) to detect different vegetation diseases and stresses. A large number of SVIs have been developed for estimation of leaf structure and pigment content (Mahlein et al., 2013). By calculating ratios of several narrow-bands at different ranges of the spectrum, SVIs result in a reduction of data dimension, which is also useful in effective data analysis for stress and disease discrimination (Delalieux et al., 2009).

Our investigations are aimed to show the efficiency of remote sensing method, measurements of leaf spectral reflectance in the visible (VIS) and near infrared (NIR) spectral ranges, for assessing the influence of some adverse natural changes in the environment such as enhanced UV-B radiation and acid rain, the effect of growth regulator MEIA and its application in combination with acid rain and UV-B on the physiological state of young deciduous trees (species *Paulownia tomentosa*).

Materials and methods

Plant material

The investigations were conducted with three months old paulownia seedlings grown as soil cultures in a growth chamber under controlled conditions (12 h light /12 h dark photoperiod, photon flux density of 90 µmol $m^{-2}sec^{-1}$, humidity 60-70%, and temperature 25±1°C). The plants were divided into six groups. The first group included healthy (control) trees. The trees from the second and third groups were treated with acid rain and enhanced UV-B radiation. The plants from the forth group were sprayed with 1 mM MEIA (beta-monomethyl ester of itaconic acid). The fifth and sixth groups of trees were sprayed with MEIA and after a day they were treated with the two natural stresses – (MEIA+acid rain) and (MEIA+UV-B).

Paulownia is ideal tree species for a forestation, improvement and restoration of contaminated with heavy metals and harmful substances soils and poor soils. Consuming these substances, the trees released them from the soil. After falling of the leaves, reaching 75 centimetres in diameter, they not only fertilized, but structured soil with natural humus. Paulownia also clears the air of harmful gases that are often with unacceptably high concentrations, especially in large industrial cities. Paulownia absorbs ten times more carbon dioxide than any tree species, releasing large amounts of oxygen (El-Showk and El-Showk, 2003).

Leaf spectral reflectance

Green vegetation species all have unique spectral features which are influenced by the leaf surface, internal architecture, life cycle, biochemical composition (pigments, water, nitrogen, minerals, etc.) and their health (Smith, 2001; Gitelson et al., 2003). The property used to quantify the spectral signatures is called spectral reflectance, a function described by the ratio of the intensity of reflected light to the illuminated light for each wavelength in VIS (0.4–0.7 µm), NIR (0.7-1.2 µm), and short-wave infrared (SWIR, 0.95-2.5 µm) spectral ranges, eq. 1:

$$R(\lambda) = L_r(\beta,\lambda)/L_i(\alpha,\lambda). \quad (1)$$

Spectral reflectance R(λ) characterizes the portion $L_r(\lambda)$ of incident energy $L_i(\lambda)$ that is reflected by a surface at a given wavelength λ. Reflectance may be further qualified by parameters such as the angle of incidence α, and the angle of reflection β.

The typical leaf features influencing the spectral reflectance in three main optical spectral regions are: leaf pigments, cell structure, and water content. Figure 1 shows an example of the spectral reflectance curves for coniferous and broadleaf species, respectively, in the optical spectrum from 0.4 to 2.5 µm. Photons of the VIS wavelengths are strongly absorbed by foliar pigments. Chl is the main pigment that absorbs blue (400 to 495 nm) and red (620 to 700 nm) light, and transfer the absorbed energy into the photosynthetic electron chain (Sims and Gamon, 2002). The values of the reflectance in this portion of the electromagnetic spectrum are low. Leaf Chl content is closely related to plant stress and diseases (Carter and Knapp, 2001; Krezhova et al., 2012). When plants undergo environmental stresses, leaf Chl content is observed to decline. This results in an increase in the reflectance and transmittance over the green and red spectral ranges.

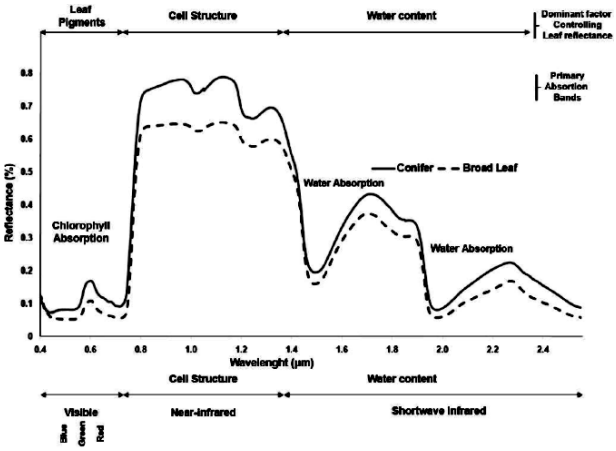


Fig. 1. Spectral reflectance curves of a coniferous and a broadleaf species in the optical spectrum from 0.4 to 2.5 µm

The reflectance for healthy vegetation increases dramaticly in the spectral range 0.68-0.72 µm (red edge position). In the NIR range (0.72-0.85 µm) the values of the reflectance are highest and the magnitude depends on leaf development and cell structure (Hyperspectral remote…, 2009). In the SWIR range strong absorption bands around 1.45, 1.95 and 2.50 µm appear and the reflectance is mainly determined by the leaf tissue and water content (Pettorelli et al., 2014).

Spectrometric measurements

Spectral reflectance was collected using a portable fiber-optic spectrometer USB2000 (Ocean Optics) in the spectral range 350-1100 nm at a spectral resolution (halfwidth) of 1.5 nm. The used detector is a high-sensitivity 2048-element CCD array. The measurements were carried out on an experimental setup in laboratory. The light signal from the object studied is guided to the entrance lens of the spectrometer by a fiber-optic cable directed perpendicular to the measured surface. As a source of light, a halogen lamp providing homogeneous illumination of measured leaf surfaces was used. In the beginning of each measurement the emitted spectrum of the source was registered from a diffuse reflectance standard. The spectral reflectance characteristics (SRC) of the investigated plants were determined as the ratio between the reflected from leaves radiation and this one reflected from the standard.

Data analyses

The Student's t-test was applied for determination of the statistically significance of the differences between the sets of the values of the reflectance spectra of healthy (control) and treated leaves. Statistical analyses were performed in four most informative for the reflectance curves of green plants spectral ranges: green (520-580 nm, maximal reflectivity of green vegetation), red (640-690 nm, maximal chlorophyll absorption), red edge (690-720 nm, maximal slope of the reflectance spectra) and NIR (720-770 nm). The statistical significance of the differences between SRC of control and infected plants was examined in ten wavelength bands (λ_1 = 475.22 nm, λ_2 = 489.37 nm, λ_3 = 524.29 nm, λ_4 = 539.65 nm, λ_5 = 552.82 nm, λ_6 = 667.33 nm, λ_7 = 703.56 nm, λ_8 = 719.31 nm, λ_9 = 724.31 nm, and λ_{10} = 758.39 nm) suggested to be disposed uniformly over the investigated ranges (Krezhova et al., 2005). First derivatives of the sets of reflectance data were calculated for assessing the red edge positions of the curves as an indicator for plant physiological status. Five narrowband vegetation indices were calculated for assesment of the changes of the physiological state of the Paulownia leaves:

- mNDVI – modified Normalized Difference Vegetation Index - an index of plant "greenness" or leaf chlorophyll content

$$\mathrm{mNDVI} = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}, \quad (2)$$

where: NIR = 750 nm, red = 705 nm;

- f_D - Disease Index (specific for individual study)

$$f_D = \frac{R_{500}}{R_{500} - R_{570}}; \quad (3)$$

- PRI - Photochemical Reflectance Index – an index of photosynthetic efficiency

$$\mathrm{PRI} = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}; \quad (4)$$

- SR - Simple Ratio index- plant stress status

$$\mathrm{SR} = \frac{R_{690}}{R_{760}}; \quad (5)$$

- Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index (TCARI)

$$3\left[(R_{700} - R_{670}) - 0{,}2(R_{700} - R_{550})\frac{R_{700}}{R_{670}}\right]. \quad (6)$$

Results and discussion

The averaged (over 25 pixels) SRCs of control and treated Paulownia leaves, measured on the seventh day after the treatments, are shown in Fig. 2. SRCs of the five treated tree groups differed against the control in all investigated spectral range (450-850 nm). In the green and red ranges (520 to 690 nm) the SRCs values are higher than the control excepting the case of enhanced UV-B radiation. This is due to decreasing of the Chl content that results in the expression of other leaf pigments such as carotenes and xanthophyll, causing a broadening of the green reflectance peak at 550 nm and an increasing of the reflectance.

In NIR range the SRC values of treated groups are lower than the control. These differences appeared as result of the changes that occurred in leaf cell structure and water content. In the case of acid rain treatment the differences are visibly largest. The leaves sprayed with MEIA looked visually like healthy leaves and their SRC are close to the control. The SRCs of leaf groups under combined treatments (MEIA+Acid rain and MEIA+UV-B) are more close to the control SRC than in the cases of single treatment.

Statistical significance of the differences between SRCs of control and treated leaves was established by means of theStudent's t-test. P-values and the sets of means are shown in Table 1. In the first column of the table R_i/R_{ic} (i = 1,…,10) designates that the data sets of spectral reflectance of the infected (R_i) and the control (R_{ic}) leaves are compared at the ten above listed wavelengths. SRC of the leaves sprayed with acid rain differed statistically significant against the control in seven of the investigated wavelengths while for the case of MEIA+Acid rain - in five wavelengths. SRC of the treated with MEIA leaves differed statistically significant in four wavelengths in spectral ranges 520-690 nm because of its stimulating growth action. For case UV-B radiation the statistically significant differences found are less (six wavelengths) than in case of acid rain. For MEIA+UV-B treatment the significant differences are four.

Table 1.
Means and p-values of the Student's t-test of SRC pairs of control and treated Paulownia leaves

Pairs	Control	Acid rain		MEIA+Acid rain		UV-B		MEIA+UV-B		MEIA	
compared	mean	p	mean	p	mean	p	mean	p	mean	p	mean
R_1/R_{1c}	6.68	ns	7.57	ns	7.94	ns	7.85	ns	7.59	ns	7.28
R_2/R_{2c}	6.83	ns	7.80	ns	8.28	ns	8.17	ns	7.81	ns	7.46
R_3/R_{3c}	18.91	***	15.11	ns	21.56	**	18.07	ns	12.17	ns	16.51
R_4/R_{4c}	25.18	***	18.89	***	28.26	*	15.00	ns	15.86	**	20.33
R_5/R_{5c}	26.44	***	19.68	***	29.96	ns	15.63	ns	16.58	***	21.12
R_6/R_{6c}	6.62	ns	6.93	ns	7.16	***	6.03	***	5.98	**	6.95
R_7/R_{7c}	29.76	**	22.31	ns	32.63	ns	17.74	***	19.67	*	23.74
R_8/R_{8c}	56.02	*	37.14	***	57.49	**	29.81	ns	38.46	ns	36.19
R_9/R_{9c}	63.20	**	40.58	**	63.58	**	32.77	**	43.43	ns	38.84
R_{10}/R_{10c}	78.67	***	47.68	***	74.50	***	38.85	**	54.26	ns	43.75

*ns – no statistical significance; * - p<0.05; ** - p<0.01; *** - p<0.001*

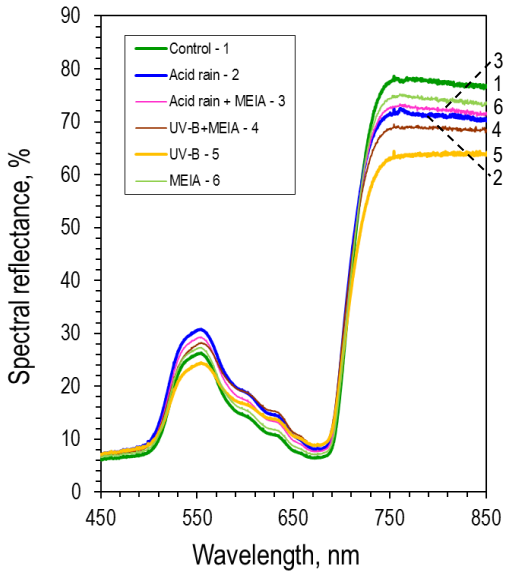


Fig. 2. Averaged SRC of Paulownia leaves: control and treated with acid rain, UV-B radiation, MEIA and their combinations on the 7th day after the treatment

First derivatives of the averaged SRCs of six leaf groups were calculated and analyses were performed to evaluate the red edge position of the SRCs. Figure 3 shows the maxima of the first derivatives of SRC of all the investigated groups. The maximal values of the main peaks of the derivatives of the five groups of treated leaves are shifted to the lower wavelengths with respect to the control. A minor difference (1 nm) is observed in the case of treatment with MEIA. For the cases (Acid rain) and (MEIA+Acid rain) the differences are about 3 nm and 1.5 nm, respectively, which reveals the favourable effect of MEIA for reduction of the stress action. In the case of UV-B the observed shift is about 2.5 nm, while the effect of the combined treatment (MEIA+UV-B) produced a shift of about 5 nm. On the 7th day after the UV-B treatment the leaves were thinner and with yellow spots.

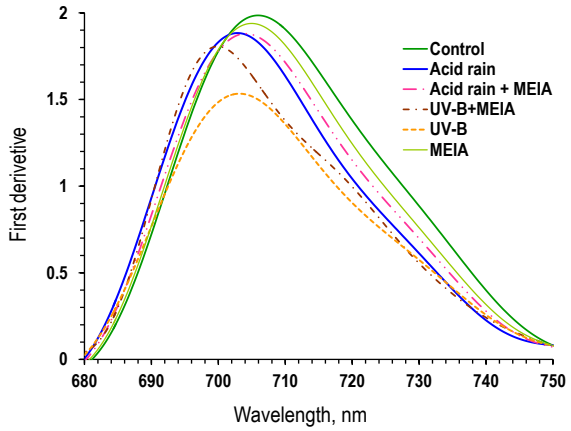


Fig. 3. Maximum of the first derivatives on SRC of control and treated with acid rain, UV-B radiation, MEIA and their combinations on the 7th day after the treatment

The averaged (over 23 pixels) SRCs of control and treated Paulownia leaves, measured on the 14th day after the treatment, are shown in Fig. 4. The five treatments lead to similar trend in the leaf spectral behaviour as on the 7th day. However, in the case of Acid rain the differences become much more expressed but (MEIA+Acid rain) action brings the SRC again more close to the control.

The results after applying the Student's t-test for sets of spectral data measured on the 14th day after the treatments are given in Table 2. The number of statistically significant differences for individual treatments is increased indicating deepening of the stress. The positive MEIA action on the plant status is confirmed. For cases (MEIA+Acid rain) and (MEIA+ UV-B) the number of statistically significant differences decreased due to the growth regulator.

Table 2.
Means and p-values of the Student's t-test of SRC pairs of control and and treated Paulownia leaves

Pairs compared	Control mean	Acid rain		MEIA+Acid rain		UV-B		MEIA+UV-B		MEIA	
		p	mean	p	mean	p	mean	p	mean	p	mean
R_1/R_{1c}	5.07	***	4.20	ns	5.00	***	3.99	***	3.15	ns	3.86
R_2/R_{2c}	5.52	***	4.95	ns	5.98	*	4.91	ns	4.07	***	4.82
R_3/R_{3c}	15.04	**	15.92	**	18.76	ns	15.07	**	13.67	ns	15.64
R_4/R_{4c}	19.64	**	20.62	**	23.18	**	18.74	ns	17.39	ns	19.24
R_5/R_{5c}	20.57	*	21.58	*	24.20	*	19.54	ns	18.18	ns	20.69
R_6/R_{6c}	5.59	*	5.28	*	6.77	ns	5.56	ns	4.65	ns	5.24
R_7/R_{7c}	23.60	**	24.30	*	27.41	ns	22.18	**	20.79	ns	23.41
R_8/R_{8c}	44.20	ns	43.15	**	42.32	***	37.00	***	35.52	***	39.50
R_9/R_{9c}	49.00	***	47.18	*	45.31	***	40.08	***	38.46	***	42.867
R_{10}/R_{10c}	58.32	**	54.33	***	50.27	***	46.13	***	43.79	***	49.96

*ns – no statistical significance; * - p<0.05; ** - p<0.01; *** - p<0.001*

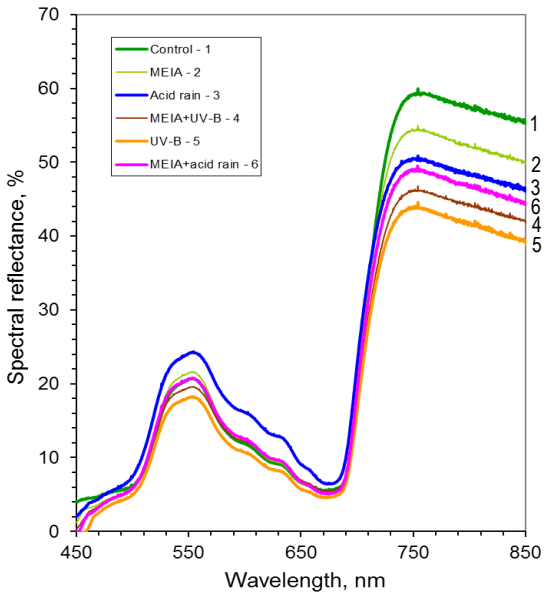


Fig. 4. Averaged SRC of Paulownia leaves: control and treated with acid rain, UV-B radiation, MEIA and their combinations on the 14th day after the treatment

Figure 5 shows the maxima of the first derivatives of the averaged SRCs of healthy and treated Paulownia leaves on the 14th day. For all cases the maxima are shifted to lower wavelengths with respect to the control. The largest difference is for the case Acid rain (about 5.5 nm). For the combination (MEIA+Acid rain) this difference is lower (approx. 3 nm). Similarly, the combination MEIA+UV-B brings down the shift of the maximum to about 2.5 nm from about 3 nm for the single treatment. This is in favour to the conclusion for the MEIA action to suppress the effects of single stresses.

Five narrow-band vegetation indices: mNDVI, f_D, PRI, SR and TCARI were computed (equations 2 to 6) for each set of spectral data. Table 3 shows the mean values of indices and statistical significance of differences against the control. The SVI data sets were processed by the method of analysis of variance for estimation of the significance of differences between variant means at levels $p < 0.05$, 0.01, 0.001 depending on the data dispersion. The best results for separation of the healthy from the exposed to natural stresses Paulownia leaves gave SVIs mNDVI and SR. For mNDVI mean values for treated groups decreased in comparison with the values of the control group while for SR – increased. In both cases the differences are statistically significant.

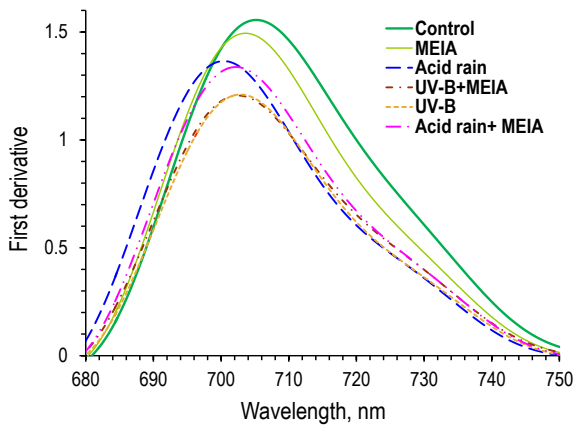


Fig. 5. Maximum of the first derivatives on SRC of control and treated with acid rain, UV-B radiation, MEIA and their combinations on the 14th day after the treatment

Conclusions

Remote sensing method, hyperspectral measurements of leaf spectral reflectance in the VIS and NIR spectral ranges, was applied for assessing the influence of some adverse natural changes in the environment such as enhanced UV-B radiation and acid rain as well as the effect of growth regulator MEIA and its application in combination with acid rain and UV-B on the physiological state of young deciduous trees (species *Paulownia tomentosa*). Statistical and first derivative analyses of the reflectance data and five narrowband vegetation indices (mNDVI, f_D, SR, PRI, TCARI) were implemented to investigate the spectral behaviour of Paulownia trees. The results prove that the spectral reflectance characteristics of the investigated plants gave best discrimination between the leaf groups in accordance with their physiological state.

Table 3.
Values of five narrow-band vegetation indices calculated in this study

Paulownia leaves	mNDVI	f_D	PRI	SR	TCARI	mNDVI	f_D	PRI	SR	TCARI
	on the 7th day after treatment					on the 14th day after treatment				
Control	0.356	0.26	0.044	0.115	55.42	0.369	0.269	0.038	0.128	43.39
Acid rain	0.309 ***	0.271 ns	0.027 ***	0.164 ***	63.81 ***	0.258 ***	0.262 ns	0.019 ***	0.208 ***	51.47 *
MEIA+acid rain	0.339 ***	0.269 ns	0.026 ***	0.149 ***	60.00 ns	0.362 ns	0.274 ns	0.024 ns	0.133 ns	56.57 ***
UV-B	0.306 ***	0.291 **	-0.001 ***	0.194 ***	49.36 *	0.304 ***	0.252 ***	0.037 ns	0.160 ***	39.32 ***
MEIA+UV-B	0.291 ***	0.266 ns	-0.007***	0.191 ***	57.04 ns	0.305 ***	0.273 ns	0.031 ***	0.178 ***	40.70 ns
MEIA	0.376 ns	0.277 ns	0.048 ns	0.124 *	57.11 ns	0.323 ***	0.249 ***	0.038 ns	0.142 *	47.00 *

ns – no statistical significance; * - p<0.05; ** - p<0.01; *** - p<0.001

References

Aggarwal, S. Spectral signature of earth objects. Lecture delivered in Edusat based training programming, Indian Institute of Remote Sensing, Dehradun, 2008.

Carter, G.A., A.K. Knapp. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. – *Am. J. Bot*., *84*, 2001. – 677-684.

Carter, G.A., B.A. Spiering, Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll content. – *J. Environ. Quality*, *31,* 2002. – 1424-1432.

Delalieux, S., B. Somers, W.W. Verstraeten, J.A.N. Aardt, W. Keulemans, P. Coppin. Hyperspectral indices to diagnose leaf biotic stress of apple plants considering leaf phenology. – *Int. J. Remote Sens*., *30,* 2009. – 1887-1912.

El-Showk, S., N. El-Showk. *The Farm*. 2003. http://www.cropdevelopment.org

Gitelson A.A., U. Gritz, M.N. Merzlyak. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. – *J. Plant Physiol., 160*, 2003. - 271-282.

Govender, M., P.J. Dye, I.M. Weiersbye, E.T.F. Witkowski, F. Ahmed. Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress. – *Water SA., 35,* 2009. - 741–752.

http://oceanoptics.com/product/

Hyperspectral remote sensing and spectral signature applications. (Ed. Rajendran, S., S. Aravindan, T. Rajakuman). New India Publishing Agency, New Delhi, 2009. – 85-97.

Kerr, J., M. Ostrovsky. From space to species: ecological applications of remote sensing. – *Trends in Ecology and Evolution*, *18,* 2003. - 299-305.

Krezhova, D., T. Yanev, St. Lukov, P. Pavlova, V. Aleksieva, D. Hristova, S. Ivanov. Method for detecting stress induced changes in leaf spectral reflectance. – *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, *58,* 5, 2005. - 517-522.

Krezhova, D. Spectral remote sensing of the responses of soybean plants to environmental stresses. Chapter 11, In: *Soybean - Genetics and Novel Techniques for Yield Enhancement* (Ed. Krezhova, D.). InTech Publisher, Croatia, 2011. - 215-256.

Krezhova, D.D., N.M. Petrov, S.N. Maneva. Hyperspectral remote sensing applications for monitoring and stress detection in cultural plants: viral infections in tobacco plants. – In: *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV* (Ed. Neale, C.M., A. Maltese, K. Richter). SPIE Proceedings 8531 Bellingham, WA, 2012, - 85311H-1 - 85311H-9.

Mahlein, A.K., T. Rumpf, P. Welke, H.W. Dehne, L. Plümer, U. Steiner, E.C. Oerke. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. – *Remote Sens. Environ.*, *128*, 2013. - 21-30.

Medina, O., V. Manian, J.D. Chinea. Biodiversity assessment using hierarchical agglomerative clustering and spectral unmixing over hyperspectral images. – *Sensors, 13*, 2013. - 13949-13959.

Myneni, R.B., J. Ross. *Photon-Vegetation Interactions: applications in optical remote sensing and plant ecologt*. Springer-Verlag, New York, 1991. – 565p.

Pettorelli, N., K. Safi, W. Turner. Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future. – *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, *369*, 2014. - 20130190.

Rumpf, T., A.K. Mahlein, U. Steiner, E.C. Oerke, H.W. Dehne, L. Plümer. Early detection and classification of plant diseases with Support Vector Machines based on hyperspectral reflectance. – *Computers and Electronics in Agriculture*, *74*, 2010. - 91-99.

Sims, D.A., J.A. Gamon. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. – *Remote Sens. of Environ*., *81*, 2002. - 337-354.

Smith, R.B. Introduction to remote sensing of the environment. www.microimages.com, 2001.

Usha K., S. Bhupinder. Potential applications of remote sensing in horticulture - A review. *Sci. Horticul*. *153*, 2013. - 71-83.

Veroustraete, F., H. Sabbe, E. Herman. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. – *Remote Sensing of Environment*, *83*, 2002. - 376-399.

Wang, K., S.E. Franklin, X. Guo, M. Cattet. Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: A review from the perspective of remote sensing specialists. – *Sensors*, *10,* 2010. - 9647-9667.

The article is reviewed by Prof. Dr. Radi Radichev and recommended for publication by the Department of Physics.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, GeologyandGeophysics, 2016

ПРЕГЛЕД НА СЪВРЕМЕННИТЕ ПОДХОДИ ЗА ЛАБОРАТОРНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РЕЗЕРВОАРНИТЕ СВОЙСТВА НА ПЛЪТНИ СКАЛИ-КОЛЕКТОРИ

Ефросима Занева-Добранова, Лъчезар Георгиев

Минно-геоложки университет „Св. Ив. Рилски", 1700 София, edobranova@abv.bg, lucho_sdng1@mail.bg

РЕЗЮМЕ. Предлаганият материал касае въпроси, свързани с преглед на съвременните подходи за лабораторно определяне на резервоарните свойства на плътни скали-колектори. Интересът към тези образования е изключително голям, с оглед на това, че в световен мащаб са установени формации с подкондиционни стойности на проницаемостта, които съдържат значителни количества от въглеводороди. За целите на определянето на техните ресурси/запаси и прогнозиране на изходните технологични показатели на тяхната разработка е важно определянето на количествени стойности на вместимостно-филтрационните параметри върху конкретни, реални образци. Изучаването на резервоарните им свойства е предизвикателство пред изследователите, тъй като класическите лабораторни методики и методи не дават удовлетворителни резултати и са неприложими. В тази връзка се полагат значителни изследователски и финансови усилия за разработване на иновационни методи. Водещи центрове са Gas Research Institute Inc. и Агроси ООО, благодарение на които са създадени съвременни апарати, които позволяват определяне, с голяма степен на достоверност на основните петрофизични показатели на плътните скали. Анализът на предлаганите методологии и методи показва тяхната приложимост в по-широк мащаб, включително и за условията на България, където са установени интересни и перспективни в нефтогазоносно отношение формации.

Ключови думи: плътни скали-колектори, лабораторна оценка

REVIEW OF THE MODERN APPROACHES FOR LABORATORY ASSESSMENT OF THE RESERVOIR PROPERTIES OF SOLID ROCKS-COLLECTORS

Efrosima Zaneva-Dobranova, Lachezar Georgiev
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, Student city, edobranova@abv.bg, lucho_sdng1@mail.bg

ABSTRACT. The suggested article concerns issues related to the review of modern approaches to laboratory determination of the reservoir properties of dense rock-collectors. The interest in these formations is extremely high, in view of the fact that globally established formations with very low permeability values contain significant amounts of hydrocarbons. For purposes of determination of their resources / reserves and forecasting of technological parameters output of their development as quantitative values capacity-filtration parameters on concrete, real samples, is important. The study of their physical properties is a challenge to researchers as traditional laboratory methods and methods do not yield satisfactory results and are not applicable. Regarding to this significant research and financial efforts to develop innovative methods are made. Leading centers as Gas Research Institute Inc. and Agros Ltd., create modern devices that allow determination with a high degree of credibility of the solid rocks main petrophysical parameters. The analysis of proposed methodologies and methods indicates their applicability in a wide scale, including the conditions of Bulgaria, where they found interesting and promising oil and gas formations.

Keywords: solid rocks-collectors, laboratory assessment

Въведение

При реализирането на проекти за търсене, проучване, разработване, изготвяне на технико-икономически анализ и оценяването на ресурсите/запасите на въглеводородните суровини в различни категории, а така също и за определянето на изходните технологични показатели на разработката им, основни задачи са изучаването на резервоарните свойства на продуктивните хоризонти. Това важи в по-голяма степен за условията на колектори, изградени от плътни скали с ниски стойности на проницаемостта.

По мнение на редица изследователи (Naik, 2010; Abdelaziz et al., 2011; Григорьев и др., 2013 и др.), добив на въглеводороди от плътни (слабо проницаеми) наслаги, днес и в близко бъдеще, ще има изключително важно значение.

Необходимостта от прилагането на специфични методологии и методи за определянето на резервоарните свойства на скалите, които са насочени към плътните колектори, е предизвикана от: тенденцията за намаляващите добиви на природен газ и нефт от резервоарни скали с „добри" резервоарни параметри; все още високата зависимост на пазара от въглеводородни енергийни суровини; бурното развитие на техниката и технологиите, които стават в по-голяма степен екологощадящи и започват да придобиват първостепенно значение; отсъствието на значителни по мащаб и много по-скъпи възобновяеми енергийни източници и др.

Целта на настоящето изследване е преглед на съвременните методични подходи за лабораторното определяне на резервоарните параметри на плътни скали-колектори и анализ на възможностите за тяхното приложение в страната.

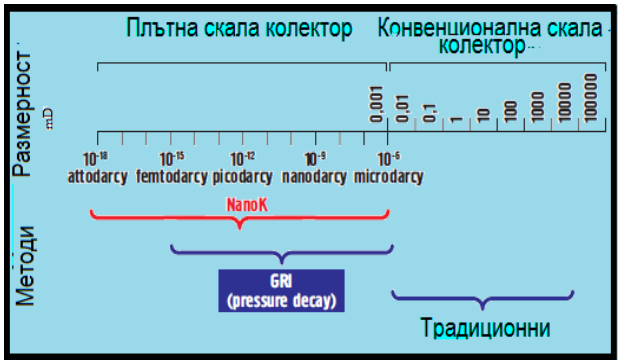
Състояние и актуалност на проблема

Общи закономерности, характеризиращи плътните (слабо проницаеми) скали

В съответствие с общоизвестните представи за плътни скали-колектори, редица изследователи (Haines, 2006; Perry, and Lee, 2007; DGMK German Society …., 2010; Naik, 2010, Занева-Добранова и др., 2012; Занева-Добранова, 2014 и др.) се обединяват около гранични стойности на: вместимостта под 10% и на проницаемостта под 0,1 mD, високо съдържание на циментиращо вещество, размери на порните канали непревишаващи 0,1 mμ; високо съдържание на остатъчна водонаситеност и с повишена механична устойчивост. При такива типове колектори коефициентът на извличане е нисък (както за въглеводородите, така и за водата), дебитите на сондажите са ниски, а запасите се усвояват по специално разработени схеми. Едновременно с това съществуват достатъчно красноречиви примери, които посочват, че в теригенни и по-рядко в глинесто-карбонатни наслаги, скалите, класифицирани като „неколектори“, са потенциални и промишлени обекти, от които се получават значителни притоци от газ и нефт (басейн Сан Хуан, Piceance - САЩ, Ордоса – Китай, Баженовска, Абалакска свита - Русия и др.). Посочените примери подсказват, че към групата на плътните скали-колектори, притежаващи значителен нефтогазоносен потенциал, могат да бъдат причислени разнотипни литоложки разновидности, и че всеки геоложки обект следва да бъде изучаван детайлно и в зависимост от конкретните дадености и целесъобразност.

Приложимост на стандартните методи

В специализираната литература и практика за присъствието на природен газ и нефт в обширни геоложки пространства с разпространение на плътни скали–колектори, се правят изследвания и проучвания от втората половина на миналия век. Едновременно с това се полагат значителни аналитични и финансови усилия за усъвършенстване на общоприетите и внедряване на нови методи на изследване. Анализът показва, че традиционните лабораторни методи за определяне на резервоарните свойства на плътните (слабо проницаеми) скали имат ограничено приложение (фиг. 1). Това най-вече се отнася за изучаването на някои водещи количествени характеристики, каквито са проницаемостта, наситеността, характерът на средата, свойствата на флуидите и др. При проектирането на разработването на плътни скали-колектори, изследването на филтрационните свойства придобива изключително значение. Понастоящем използването на традиционните методи не дава задоволителни резултати. Така например при съществуващите стандартни лабораторни оборудвания и процедури за измерване, диапазонът на газопроницаемостта (показател, който се приема за определящ) за традиционните колектори най-често се ограничава до 0,1 mD и в по-редки случаи до 0,01 mD. Посочените стойности се приемат като гранични за класифицирането на скалите като колектор/ неколектор. Скали с проницаемост под 0,01 mD се причисляват към труднопроницаемите и неперспективни в нефтогазоносно отношение. Една от причините е възможностите на стандартното оборудване и общоприетата методика за лабораторно изследване. Ето защо, за лабораторното изучаване и определяне на количествените показатели на плътните скали се налага прилагането на нови методични подходи и иновационно оборудване.



Фиг. 1. Диапазон на лабораторните методи за определяне на резервоарните свойства на скали колектори (Эксплуатация нетрадиционных залежей…., 2016, www.corelab.com/ru/ps/gri-analysis)

Преглед на някои иновационни методики и оборудване

Водещи лаборатории, които се явяват доставчици на услуги за анализиране на скален и флуиден материал за целите на петролната индустрия, са американската Core Laboratories, Inc. и руската ГК Агроси ООО. В резултат на съвместната им дейност е разработено съвременно лабораторно оборудване, което предлага аналитични системи за изследване, с достатъчна прецизност, на скални образци от плътни скали и получаване на важни количествени параметри, определящи резервоарните им качества.

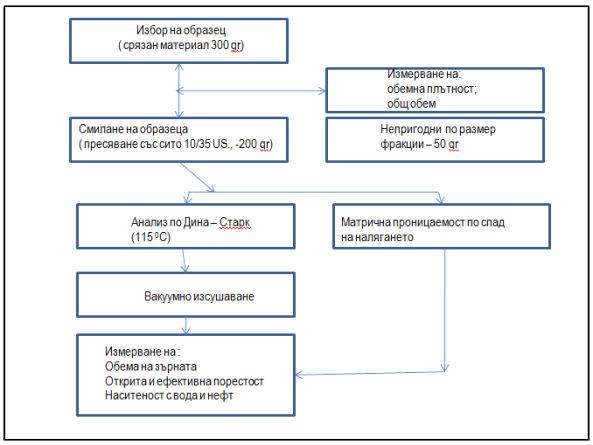
Интерес представляват системите GRI (Gas Research Institute - Crushed Shale Analysis) и NanoK. По същество методиките, заложени в тези системи, не се отличават съществено от класическите за изучаване на резервоарните свойства скалите и се основават на фундаментални постижения и закони на физиката на нефтения пласт, хидро- и термодинамиката и др. Различното, в конструктивен план, е в устройството на предлаганите апаратури, възможността за комплексно изследване на различни характеристики, автоматизирането на процеса и съкращаването на времетраенето на експеримента.

Представител на системата GRI е методът SMP (Shale Matrix Permeameter), който се осъществява с прибор SMP - 200 (фиг. 2). Характерно за метода е, че се изследва интегриран и дезинтегриран образец от изучаваната скала. Върху интегрирания образец се определя обемната плътност, непосредствено след изваждането на ядката. По-нататък, чрез раздробяване на пробата до размер на зърната от 0,853 до 0,5 mm, се извлича съдържащите се в порите флуиди чрез екстрахиране. Следва определяне плътността на зърната, вместимостта и наситеността на скалата.

За определяне на проницаемостта, пробата се поставя в камера за изпитание с хелий като реагент, създава се налягане (около 200 kPa) за определено време, след което се снема крива на спадане на налягането. Получават се данни за ефективната и абсолютната проницаемост на матрицата с възможен диапазон от 10^{-6} до 10^{-15} D. В

основата на принципа на работа на пермеаметъра е законът на Бойл-Мариот. Принципната схема на последователността на изследването е показана на фигура 3.

Фиг. 2. Общ вид на пермеаметър SMP-200 (Эксплуатация нетрадиционных залежей…., 2016, www.corelab.com/ru/ps/gri-analysis)



Фиг. 3. Последователност на изследването (Эксплуатация нетрадиционных залежей…., 2016, www.corelab.com/ru/ps/gri-analysis)

Представител на системата NanoK е метод за определяне на свръхниска проницаемост чрез цифров нано-пермеаметър NanoK-100 (фиг. 4). Изследването се осъществява в стационарен режим на филтрация на газ (метан или азот), с отчитане на ефекта на Клинкенберг в три независими позиции. За осъществяване на експеримента се използват цилиндрични образци, предварително подготвени (екстрахирани и изсушени). Диапазонът на измерената проницаемост е 10^{-6} – 10^{-18} D. Параметрите на експеримента и на получените резултати са: налягане на входа и на изхода; ефективно налягане (до 66,7 MPa); три замера на налягането; абсолютна и ефективна проницаемост; коефициент на проницаемост, който се определя графично по зависимостта $K_{пр.газ} = f(1/P)$.

Аналитичните системи от ново поколение GRI и NanoK имат реално приложение в практиката за изучаването на плътни скали-колектори. Като пример за това (Добрынин и др., 2004; Тонконогов и Мулер, 2013) са изследванията, проведени в находище Eagle Ford, Южен Тексас, Баженовската свита и др. Получените данни за резервоарните свойства на плътните скали се отличават с повишена достоверност и по-широк диапазон на измерените параметри. Основните ограничения се свеждат до невъзможност за отчитането на някои физико-механични характеристики (влиянието на напрежението в пласта, в това число и на свиваемостта на порния обем, влиянието на напукаността и геометрията на поровото пространство) върху получените параметри. Поради тези причини тяхната приложимост е в достатъчна степен коректна за определяне на параметрите на матрицата.

Фиг. 4. Общ вид на цифров нано-пермеаметр NanoK-100 (Shale Oil/Gas Training…, 2016, www.corelab.com/cli/shale-oil-gas/nanok-permeameter)

Заключение

Проблемът с лабораторното изучаване на вместимостните и филтрационните свойства на плътните скали-колектори е обект на изследователски институции в широк мащаб. Съществуващите традиционни лабораторни оборудвания са неприложими. Ето защо, в световната практика се полагат значителни усилия и се внедряват нови иновационни системи за повишаване на достоверността на определяните количествени параметри.

За условията на България, където са налице геоложки формации, изградени от трудно проницаеми скали, перспективни в нефтогазоносно отношение, е крайно необходимо въвеждането на световните образци за лабораторни изследвания. Те, както и други методи, могат да повишат достоверността на изследователския процес и да дадат отговор на редица въпроси, свързани с проблемите по определянето на изходните технологични показатели при разработката на остатъчни и установяването на нови ресурси/запаси.

Литература

Григорьев, Б. А., Д. М. Орлов, Н. В. Савченко, А. Е. Рыжов. Исследование начальных градиентов давления при фильтрации через низкопроницаемые породы-коллекторы. - *Научно-технический сборник Вести газовой науки, 1*, 2013. - 119-125.

Добрынин В. М., Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников, *Петрофизика* (*физика горных пород*). *Иновационные методы петрофизических исследований нископроницаемых горных пород*. М., Нефть и газ, 2004. – 367с.

Занева-Добранова, Е. Природен газ в слабопроницаеми теригенни формации (Tight Gas). - *Год. МГУ, т.57, св. 1,* 2014. - 59-64.

Занева-Добранова, Е., Щ. Льомов, А. Ангелов. *Неконвенцио-нални източници на въглеводородни ресурси, техно-логии и екологични предизвикателства.* С., Изд. къща

„Св. Ив. Рилски", 2012. - 211с.
Тонконогов, Ю. М., П. Б. Мулер. Иновационные методы петрофизических исследований нископроницаемых горных пород. - *Нефтегазовая вертикаль, 9*, 2013. - 34-36.
Эксплуатация нетрадиционных залежей. Анализ кернов методом GRI (анализ дробленых сланцев). 2016. www.corelab.com/ru/ps/gri-analysis
Abdelaziz, K., H. Qutob, N. Barakat, H. Harhad, E. M. Yettou, A. Mazouzi. Taking up unconventional challenge is a game changer in Oil and Gas Industry, Corresponding, 2011. - Author: abdelaziz.khlaifat@me.weatherford.com
DGMK *German Society for Petroleum and Coal Science and Technology. Website*: 2010. http://www.dgmk.de/, sited: July 25th
Perry, K., J. Lee, Unconventional Gas Reservoirs—Tight Gas, Coal Seams, and Shales, 2007.
Haines, L. Unlocking Tight-Gas Supplies, 2006.
Naik G. C. *Tight Gas Reservoirs – An Unconventional Natural Energy Source for Future*, 2010. http://www.pinedaleonline.com/socioeconomic/pdfs/tight_gas.
Shale Oil/Gas Training Equipment. NANOK Permeameter - NANOK-100. NEXT, Course Catalog, 2016. – 358p. www.corelab.com/cli/shale-oil-gas/nanok-permeameter

Статията е рецензирана от доц. д-р Мартин Бояджиев и препоръчана за публикуване от кат. „Сондиране, добив и транспорт на нефт и газ".

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ С ИНГИБИТОРАМИ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ

Дина А. Султанова, Дмитрий В. Мардашов, Радмир Р. Хусаинов

Санкт-Петербургский Горный Университет, 199106, Санкт-Петербург, rectorat@spmi.ru

РЕЗЮМЕ. В статье представлены результаты лабораторных исследований по оценке эффективности ингибиторов коррозии в условиях совместного применения с ингибиторами солеотложений. Анализ результатов проведенных исследований показал, что защитные свойства ингибиторов коррозии, при добавлении ингибиторов солеотложений, могут изменяться в лучшую, либо в худшую сторону.

Ключевые слова: Ингибиторы, оценка совместимости, эффективность, защитное действие, поляризационное сопротивление, скорость коррозии.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF CORROSION INHIBITORS IN CONDITIONS OF JOINT USE OF INHIBITORS OF SCALING

Dina Sultanova, Dmitry Mardashov, Radmir Khusainov
Saint-Petersburg mining university, 199106, Saint-Petersburg, rectorat@spmi.ru

ABSTRACT. The article presents the results of laboratory studies to assess the effectiveness of corrosion inhibitors in conditions of joint use of a scale inhibitor. Analysis of the results of these studies have shown that the protective properties of corrosion inhibitors, adding scale inhibitors might change for the better or for the worse.

Keywords: Inhibitors, evaluation of compatibility, effectiveness, protective effect, polarization impedance, current density.

Введение

В связи с ухудшением структуры запасов, процесс добычи нефти значительно усложнился. Проблемы, связанные с коррозией оборудования, отложением солей, становятся с каждым годом все актуальнее. Так как эксплуатация нефтяных скважин проходит в сложных условиях: высокие температура и давление, постоянное взаимодействие с агрессивной средой (особенно на месторождениях с высокой обводненностью добываемой продукции) – срок службы используемого оборудования значительно сокращается.

Анализ результатов

В наибольшей степени коррозионному износу подвержен корпус погружного электродвигателя, рабочие органы и корпус электроцентробежного насоса, внутренняя поверхность насосно-компрессорных труб, броня кабеля. Дополнительным осложнением от протекающих коррозионных процессов может являться снижение проницаемости призабойной зоны пласта в случае попадания в нее продуктов коррозии (Рогачев и др., 2011).

Устранение последствий, связанных с коррозионными разрушениями и отложением солей, значительно повышает эксплуатационные затраты нефтегазодобывающих предприятий, что негативно отражается на себестоимости добываемой нефти.

Химический метод в профилактике от коррозионных разрушений и выпадения солей является наиболее используемым, применение ингибиторной защиты наиболее характерно в случае необходимости принятия оперативных мер по предупреждению данных осложнений.

Коррозия внутрискважинного оборудования на месторождениях Западной Сибири развивается преимущественно по углекислотному механизму, в процессе которого происходит диссоциация угольной кислоты на бикарбонат-ион и ион водорода, с образованием осадка карбонатных соединений железа и кальция (Габитов, 1998; Маркин и др., 1995).

Среди многообразия видов коррозионных повреждений углекислотной коррозии можно выделить наиболее опасные – локальные коррозионные повреждения с высокой скоростью проникновения.

Для предотвращения углекислотной коррозии в большинстве случаев применяют неорганические ингибиторы катодного и анодного действия, защитный эффект которых сопряжен с формированием пассивирующих пленок. Механизм действия подобных

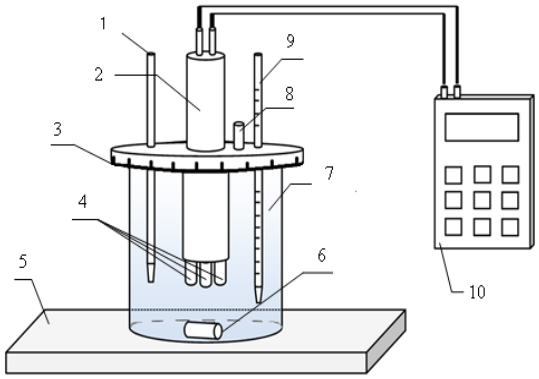
ингибиторов заключается в торможении коррозионного разрушения путем его воздействия на скорость прохождения катодного, анодного, либо обоих коррозионных процессов.

Для оценки защитных свойств ингибиторов коррозии применяются электрохимический, гравиметрический и аналитический методы.

В представленной работе оценка эффективности ингибитора коррозии осуществлялась методом поляризационного сопротивления на потенциостате Gill 12, который относится к электрохимическим методам.

Преимущество метода линейного поляризационного сопротивления заключается в быстроте измерений и простоте постановки эксперимента, а также в возможности произвести замер скорости коррозии в режиме реального времени (Мониторинг скорости корозии…).

На фигуре 1 представлена схема лабораторной установки, которая использовалась в данной работе для оценки эффективности ингибиторной защиты.



Фиг. 1. Схема электрохимической установки:
1– вход CO2; 2 – зонд (держатель электродов); 3 – кольцевое уплотнение; 4 – электрод; 5 – магнитная мешалка; 6 – магнитный якорь; 7 – вода пластовая; 8 –выход CO2; 9 – термометр; 10 – коррозиметр

Прибор отображает значение скорости коррозии в [миллидюймах в год], а используемый коэффициент пропорциональности, является эмпирическим числом, который определен путем сравнения значения поляризационного сопротивления с величиной потери веса. По итогам тестирования рассчитывается защитный эффект ингибиторов коррозии.

Исследования по определению влияния ингибиторов солеотложения (ИС) на эффективность ингибиторов коррозии (ИК) проводились с моделированием пластовых условий, наиболее характерных для нефтяных скважин Западной Сибири. Состав модели пластовой воды, подготавливаемой для экспериментов, соответствовал усредненному составу вод данного региона (табл. 1).

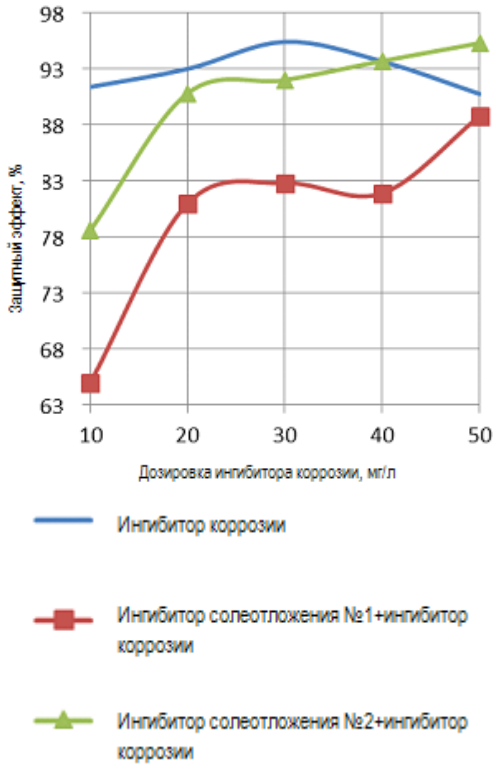
Для проведения испытаний в качестве модели пластовой нефти использовалась углеводородная смесь, приготовленная согласно (Nace Paper …., 2013) и состоящая из керосина, изооктана и орто-ксилола, взятых в равных объемах. При проведении экспериментов моделировалась обводненность скважинной продукции 90%. Ингибитор коррозии дозировался при 5-ти концентрациях: 10, 20, 30, 40, 50 mg/l, а ингибитор коррозии − при одной концентрации (25 mg/l).

Таблица 1.
Солевой состав модели пластовой воды

Солевой состав, g/dm³	CaCl2	2,122
	MgCl2	0,878
	KCl	0,15
	SrCl2×6H2O	0,794
	BaCl2×2H2O	0,92
	Na2SO4	0,013
	NaHCO3	0,563
	NaCl	30,927

Перед началом проведения лабораторных экспериментов модельная пластовая вода насыщалась двуокисью углерода в течение 0,5 часа с целью деаэрации. При проведении исследований производилось постоянное барботирование испытуемой среды углекислым газом с рекомендуемым расходом газа – 1-2 пузырька в секунду.

На фигуре 2 представлены результаты оценки эффективности ингибитора коррозии при различных концентрациях, а также оценка эффективности ингибиторов коррозии в условиях совместного применения с ингибиторами солеотложений.



Фиг. 2. Динамика защитного эффекта ингибитора коррозии при различных концентрациях

По результатам оценки эффективности ингибитора коррозии, можно сделать следующие выводы:

Исследуемый ингибитор коррозии проявляет защитное действие свыше 90 % во всем диапазоне концентраций (от 10 до 50 mg/l).

Для данных условий максимальная эффективность ИК достигается при дозировке 30 mg/l.

Можно отметить снижение защитного действия ингибитора коррозии, при повышении его концентрации выше 30 mg/l, что можно объяснить наличием в реагенте активного вещества, способного разрушать образуемую защитную пленку при избыточных концентрациях.

Анализ результатов исследований по оценке влияния ингибиторов солеотложения на защитное действие ингибитора коррозии показал, что данные реагенты снижают эффективность защиты от коррозионных процессов.

Например, при дозировке в 30 mg/l эффективность ингибитора коррозии снизилась на 12% при совместном применении с ИС №1 и на 3% − при применении с ИС №2.

Стоит отметить, что ингибиторы солеотложений оказывают различное влияние на действие ингибитора коррозии. При добавлении ИС №1 эффективность ИК снизилась во всем диапазоне концентраций (от 10 до 50 mg/l). Однако при совместном применении ИС №2 и ИК в области концентраций от 40 до 50 mg/l происходит рост защитного эффекта от коррозии, в сравнении с чистым ИК. В то же время в области концентраций от 20 до 40 mg/l совместное воздействие реагентов на эффективность ингибирования незначительно уступает чистому ИК.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о необходимости проведения комплекса работ по оценке совместимости реагентов различного назначения.

Литература

Габитов А.И. *Технологии производства и применения ингибиторов коррозии на нефтехимических и нефтедобывающих предприятиях*. Автореф. дис. д-ра тех. наук., Уфа, 1998. – 60 с.

Маркин, А.Н., А.Ю. Подкопай, Р.Э. Низамов. Коррозионные повреждения насосно-компрессорных труб на месторождениях Западной Сибири. - *Нефтяное хозяйство*, *№5*, 1995. - 30 – 33.

Мониторинг скорости коррозии по методу линейного поляризационного сопротивления (LPR) [Электрон-ный ресурс]// URL: http://advanter-rf.com/lprintro.htm (дата обращения 14.01.2016).

Рогачев, М.К., К.В. Стрижнев, Д.В. Мардашов,, А.Р. Мавлиев. Исследование антикоррозионных свойств технологических жидкостей для скважинной добычи нефти. – *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»,,* №3, 2011. - 462– 471.

NACE Paper No.2345. Corrosion Mechanism of Carbon steel in MDEA-Based CO2 Capture Plants. USA, 2013.

Статията е рецензирана от доц. д-р Валери Златанов и препоръчана за публикуване от кат. „Сондиране, добив и транспорт на нефт и газ”.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

ГЕОТЕХНИЧЕСКИ УСЛОВИЯ НА ТУНЕЛ „ЖЕЛЕЗНИЦА" ОТ АМ „СТРУМА"

Антонио Лаков, Стефчо Стойнев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; tony_lakov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Направен е преглед на отделните елементи, определящи геотехническите условия в участъка на тунел Железница (част от изграждането на АМ „Струма"): геолого-тектонски строеж, сеизмотектонски условия, хидрогеоложки условия, инженерногеоложки свойства на скалния масив. По-детайлно са разгледани инженерногеоложките свойства на разновидностите, изграждащи скалния масив. Характеристиката им е направена на базата на качествени оценки (показателя RQD – показател за качеството на скалата и GSI – геоложки индекс за якостта на масива)и количествени оценкиот лабораторните и полевите (геофизични и еластиметрични) изследвания. Дадена е обща характеристика на хидрогеоложките условия и са оценени очакваните водопритоци в тунела. Направени са общи изводи и заключения за условията на проектиране и строителство.

GEOTECHNICAL CONDITIONS OF JELEZNICA TUNNEL FROM STRUMA HIGHWAY

Anotnio Lakov, Stefcho Stoynev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700; tony_lakov@abv.bg

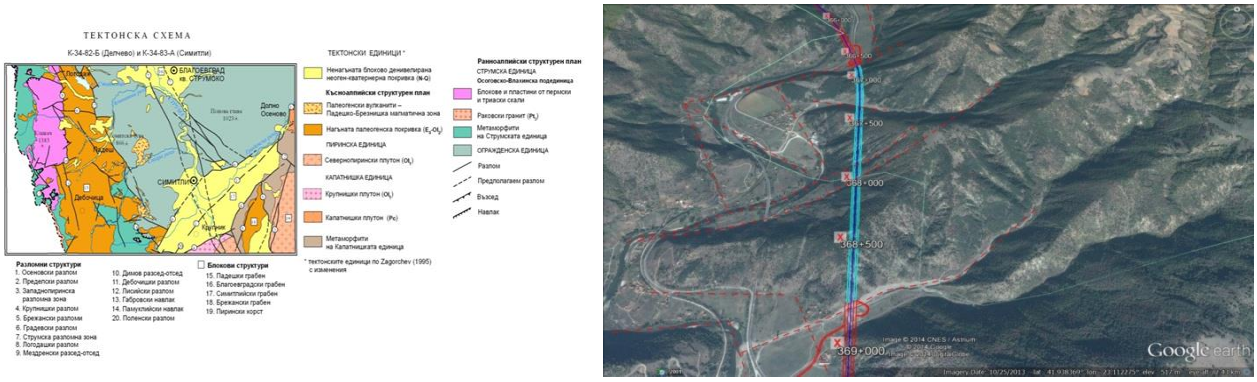
ABSTRACT. A review of thegeological and tectonic structure, the seismicq hydrogeological and engineering geological conditions conditions of the rockmass was carried out as elements of the geotechnical conditions of the Jeleznica tunnel from the Struma Highway. More detailed characterisitcs are made to the engineering properties of the identified rock types. It is based on qualitative parameters as RQD and GSI and quantitative paramters based on the results from the laboratory and fireld (geophysical and elastmetric) tests. General description of the hydrogeological conditions and the estimated in-flow in the tunnel is presented. General conclusions for the design and construction are presented.

Въведение

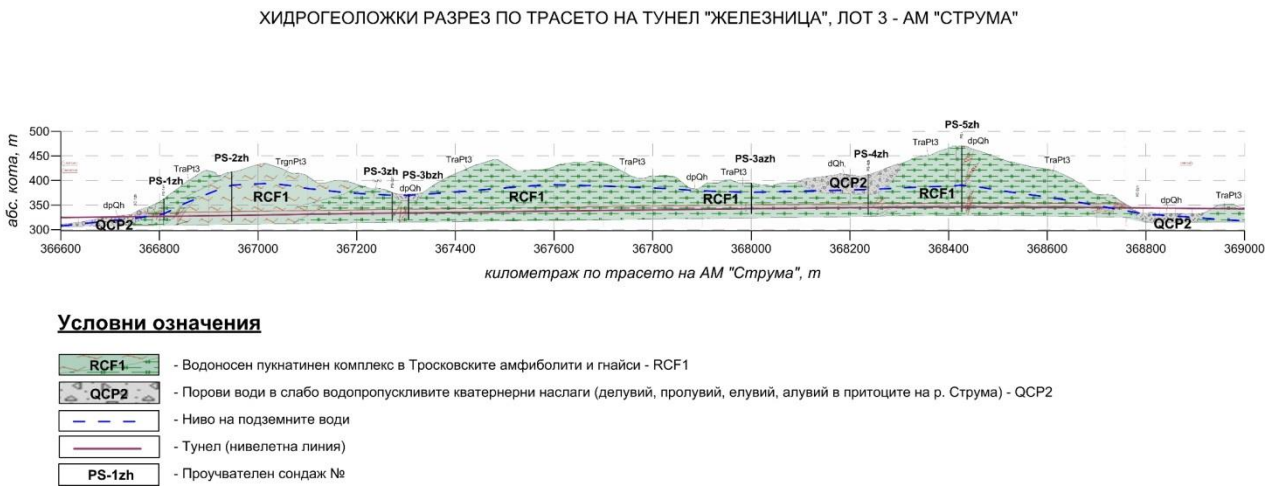
Завършването на АМ „Струма" е свързано с изграждането на два тунела – Кресна и Железница. Изграждането на тунел Кресна е съпроводено с редица технически, икономически и екологични проблеми, поради което се търси нова алтернатива на магистралата в този участък, докато тунел Железница е практически без алтернатива. Неговото изграждане е наложително и поради факта, че в момента се изгражда участъкът от Благоевград до Симитли, който не включва тунела. Проектното решение за изграждането на тунела предвижда дължината му да бъде 2040 m. Извършените през 2014-2015 г. на етап Идеен Проект проучвателни дейности по трасето на тунела включват: структурно-геоложка картировка, сеизмично профилиране по оста на тунела, прокарването на 8 бр. вертикални, наклонени и хоризонтални сондажи; сеизмичен каротаж, еластиметрични изследвания, нагнетяване тип Люжон, водоваливания и водочерпене в сондажите; лабораторни изследвания на скални и земни проби. Обобщените резултати от тези изследвания са представени в настоящата статия (Стойнев, 2015).

Геолого-тектонски строеж

Трасето на тунела преминава изцяло през Железнишкия хорст, разделящ Благоевградския (Джерманския) от Ораново-Симитлийския грабен. Той е изграден от сравнително еднообразни скали: предимно докамбрийски високостепенни метаморфити и кватернерни континентални наслаги (Желев, 2014). Докамбрийските високостепенни метаморфити са представени от Тросковския метаморфен комплекс, включващ две съвкупности. В първата преобладават амфиболити и амфиболови гнайси с тела от ултрабазити, а във втората – двуслюдени и биотитови гнайси, процепени от кварцови жили. Амфиболитите преобладават в изграждането на пролома, а гнайсите имат подчинено разпространение – разкриват се под формата на лещообразни тела между амфиболовите гнайси и амфиболитите. Амфиболитите са меланократни, сивозелени на цвят, дължащ се на основния скалообразуващ минерал - амфибола. Амфиболовите гнайси имат мезократен облик, поради значителното количество на плагиоклаза, съизмеримо с това на амфибола. Тросковските гнайси са левкократни скали, контрастни на амфиболитите и включват плагиоклаз, кварц, мусковит и биотит като главни скалообразуващи минерали. Често гнайсите се прослояват или са процепени от кварцови жили с дебелина до 10 m. Кватернерните наслаги са представени от няколко литогенетични единици: алувиални, пролувиални, делувиални и алувиално-пролувиални. Алувиалните седименти са свързани с р. Струма, която прорязва старите метаморфити в обхвата на Железнишкия пролом, като отлага върху тях напрекъснато алувиални наслаги (чакъли, пясъци, глини). В основата на бреговете на реката се развиват делувиални наслаги (предимно груботеригенни брекчи с глинеста спойка), а около водосливите на притоците се образуват пролувиални конуси (чакъли, валуни, пясъци).



Фиг. 1. Тектонска карта на района на Кресненското дефиле (*по Милованов и др., 2009, с допълнения*)и интерпретационна схема върху сателитна фотография на Google Earth на разломните структури (червени прекъснати линии) в района на тунелите (в син цвят)



Фиг. 2. Геоложки разрез през трасето на тунела

В тектонско отношение трасето на тунела върви успоредно, но в близост до множество разломи, които по посока се отнасят към две групи: Краищидна (150-170°) и Твърдишка (40-60°).

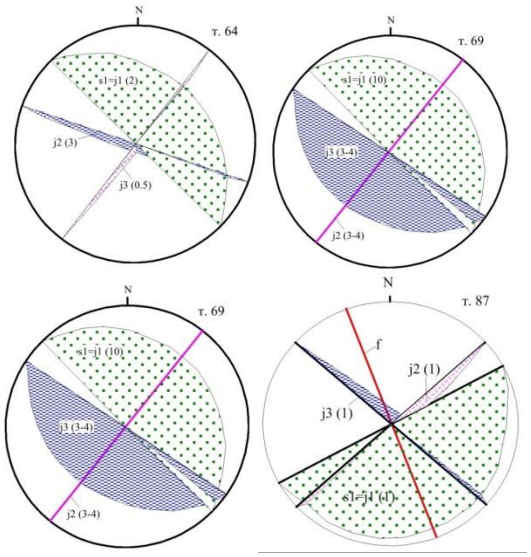
Разломите от първата група преобладават и принадлежат на един разломен сноп с широчина около 5 km, означаван като Струмска разломна зона. Трасето на тунела върви успоредно на него, като на места пресича някои от съставните му разломни структури (фиг. 1). В регионален аспект формирането на грабените по протежението на реката и нейната генерална посока (170°) е предопределена от тази разломна зона. Интерпретацията на линеаментите в участъка на тунелите при с. Железница показа (фиг. 3), че тези две разломни системи са предестинирали резките завои на реката в Железнишкия пролом. Ако се свържат праволинейните й участъци между завоите, ще се получат фрагменти от двете системи, които оформят блокова мозайка. В участъка на тунела се установяват минимум три деформационни етапа: ранен (синметаморфен), среден и късен (неотектонски). Първият етап е свързан с метаморфизма на Тросковския комплекс (неопротерозой), когато в него се формира фолиацията и широки милонитни зони в гнайсите, маркирани от очни гнайси. Тези структури са изцяло литифицирани и не влияят на устойчивостта на скалния масив. Втората група деформации се свързва с тектонските събития, които Тросковските метаморфити са претърпяли в един много широк интервал, обхващащ целия палеозой, мезозоя и голяма част от неозоя. Липсата на геоложки летопис в този регион не позволява разпознаването на каледоно-херцинските, кимерските и част от алпийските структури, установени на север в Балканидите и северния блок на Краищидите. Със сигурност към Савските деформации може да се отнесе само една широка зона с хидротермална промяна, разкрита в шкарпа на стария път от Благоевград за Железница югозападно от участъка.Тя продължава в Церовски дол, където е покрита от кватернерни алувиално-пролувиални наслаги. Свързва се с тектоно-магматичните събития в края на палеогена (олигоцена), когато на юг (извън района) се внедряват Кресненският и Севернопиринският плутони. Разломите, свързани с тези събития, се разпознават по хидротермалнопроменените скали около тях. Освен това, те се различават от неотектонските структури по малките наклони на разломните повърхнини.

Неотектонските структури са представени от две широки (25-30 m) зони на катаклаза в северната част на участъка, които се маркират от негативни релефни форми (седловина и рязка пречупка в релефа) – резултат от интензивна напуканост. Друга подобна структура е

установена северно от ретранслатора, като тук тя има характер на малък разлом с тектонска глина, но на югоизток (към Градевското дере) преминава в зона на катаклаза. Тук са установени още два малки разлома, маркирани от тектонска глина. Неотектонските разломи са вертикални, но кинематиката им не може да се установи, поради липса на маркиращи стратиграфски нива в метаморфитите. В сондажната ядка тези деформации се маркират от интервали с черна тектонска глина (милонит) или зони на катаклаза със значителна загуба на ядка.

Фолиацията е основната проникваща структура във високостепенните метаморфити. Генералната ѝ посока е СЗ-ЮИ с посока на потъване предимно на СИ. Ъглите на потъване варират в широки граници (от 18 до 70°), което показва интензивна гънкова деформация. Общо взето фолиацията очертава една моноклинална структура – фрагмент от бедро на голяма гънка. Наблюдаваните вариации в посоката на фолиацията най-вероятно се дължат на второразрядни гънки, резултат от дисхармонична нагънатост, или на късната блокова дезинтеграция и денивелация.

Пукнатините във високостепенните метаморфити оформят три ясно изразени групи (фиг. 3.). Те са ориентирани закономерно спрямо фолиацията, като ясно очертават една ортогонална пукнатинна система. Първата пукнатинна група (j1) съвпада с фолиацията (s1). Тя е най-ясно изразена и с най-голяма гъстота (7-8 бр./m).



Фиг. 3. Обобщени диаграми за ориентировката на фолиацията (s1) и пукнатинните групи (j) и разломите (f) вметаморфитите наТросковския метаморфен комплекс. В скоби е показан броят на пукнатините на линеен метър.

Пукнатините са гладки и издържани. В централната част на участъка по тях са внедрени доста дебели кварцови жили. Втората група (j2) е нормална на j1 и има посока СЗ-ЮИ, като потъва стръмно на ЮЗ. Пукнатините са стерилни и имат характер на структури на срязване. Третата пукнатинна група (j3) е субвертикална с посока ЮЗ-СИ. Тя също е стерилна, но на места по нея се наблюдават следи от движения (харниши) (Стойнев, 2015).

Сеизмотектонски условия

Районът на Железнишкия хорст е разположен в еднаот най-сеизмичноактивните области от тази част на Балканския полуостров. Тунелът Железница попада в Кресненската сеизмична зона, като пресича основните активни структури, които са генерирали силни земетресения. Тази зона е известна с най-силното земетресение в Европа през последните 200 години (на04.04.1904г.)с магнитуд M=7,5 според изчисленията в Пасадена (САЩ).Съществуват и данни за възможни две последователни събития с магнитуди, съответно 7,2 и 7,8. Вероятно хипоцентрите на главните събития, както и афтершоковата серия през следващите две години, са били свързани с регионалния и много активен съвременен Крупнишки разлом (Shanov, Dobrev, 2000).

Съвременните сеизмотектонски условия в зоната на тунела се определят основно от два разлома, определящи се като активни – Падешки разлом и Крупнишки разлом.

Падешкият разлом пресича трасето на магистрала „Струма" северно от тунел Железница. Той формира добре изразен съставен разломен откос с височина до 270 m. Посоката е N 50°. Разломът затъва на СЗ. Той е ясно изразен като структура в гравитационното поле. Съвременната сеизмичност е концентрирана в блока, ограничен от Падешкия разлом и Крупнишкия разлом. Разломът контролира неогенската, вкл. плейстоценската и холоценската седиментация в понижения СЗ блок. Стратиграфският интервал на басейните предполага неотектонска и съвременна активност на разлома. Изследванията на (Шанов, Добрев и др., 2009) показват, че разломът е активен, като въз основа на установените амплитуди на преместване при едно събитие, очакваното максимално земетресение ще бъде с магнитуд Ms > 7.

Крупнишкият разлом пресича трасето на магистрала „Струма", точно пред северния вход на тунела. Той е система от разломни сегменти с преобладаващо направление СИ-ЮЗ (N 50-60°), затъващ с ъгъл 50-62° на СЗ (Vrablianski, 1974). Сеизмотектонските изследвания по дължината на разлома не позволяват да се съди за магнитудите на силните земетресения, които могат да се генерират от Крупнишкия разлом. Преместванията по него, обаче, красноречиво показват, че магнитуди над 7,0 могат да се генерират, което и става през 1904 г.

Хидрогеоложки условия

Трасето на тунел „Железница»"преминава изцяло през магмено-метаморфен водоносен комплекс с пукнатинни води (RCF) (фиг. 2). Скалният масив е с различна степен на напуканост и проницаемост. Стойностите на коефициента на филтрация, определени от опитните водонагнетявания и водоналивания, са разположени в диапазона между 10-5 m/d и 10-1 m/d, а средната му стойност е k = 0,011 m/d, т.е. комплексът се характеризира с относително ниска водопроницаемост. Дълбочината на водното ниво под терена варира в широки граници – от 1-2 m до повече от 80 m - в зависимост от релефа. Формираният в масива водоносен хоризонт с пукнатинни води е насочен

генерално към р.Струма, като напорният градиент е сравнително висок - в зоната около тунела е в границите от 0,14 до 0,42. Оценката на очаквания водоприток показва, че тунел Железница е с относително малка водообилност. Единичният приток (на 1m) варира между 0.09 и 0.26 (m^3/d)/m, като средната му стойност 0.15 (m^3/d)/m = 150 (l/d)/m ≈ 0.00174 l/s на m. Следва да ieотбележи, че независимо от общо взето невисоката водообилност на масива, има участъци, които трябва да се преминават с повишено внимание, тъй като в тях не са изключени по-високи водопритоци от указаните. Такива участъци могат да бъдат: а) местата в близост до големите разломи; б) участъците, където тунелът минава на малка дълбочина под някои по-големи дерета – обрушванията и напукването на скалите от взривните работи тук може да доведе до увеличен водоприток от съответната река.

Инженерногеоложки свойства на скалите

Геотехническите условия на тунела се определят от инженерногеоложките свойства на Тросковските амфиболити и гнайси (TraPt3), които изграждат геоложкият му разрез. Инженерногеоложката характеристика на техните свойствата е направена на базата на две групи показатели:

- ***Качествени показатели за свойствата на скалния масив:***
  - ✓ RQD – показател за качеството на скалата;
  - ✓ GSI – геоложки индекс за якостта на масива.
- ***Количествени показатели за свойствата на скалния масив, основани на резултатите от лабораторни и полеви изследвания.***

Определяне на RQD

Показателят RQD е определен на базата на общоприета методика и представлява отношението (в %) на общата дължина на здравите скалните късове от сондажната ядка с височина над 10 cmкъм общата дължина на рейса на сондиране. При неговото определяне не са вземани предвид късовете, отделени по техногенни пукнатини. В тектонските или милонитни зони на пълно стриване на скалите, стойности за RQD не са определяни. Доколкото RQD е използван като основен показател за характеризиране на структурната нарушеност на скалите, за всеки сондаж неговата стойност е определена като средно тежестна по отношение на дължината на рейсовете за следните условия:

- средна стойност за скалния масив за цялата дълбочина на сондажа, преминаваща в скални разновидности;
- средна стойност за скалния масив за зоната на тунела.

Получените средни резултати за поделените ИГР са представени в таблица 2.

Определяне на GSI

Показателят GSI е качествена характеристика на масива, определяна по стандартна скала, предложена от Marinos, Hoek (2000), като участващите в нея основни характеристики са степен на напуканост и блоковост на масива (по вертикалната скала) и характер и състояние на пукнатините между блоковете (по хоризонталната скала). Доколкото в оригиналния вид на скалата тези показатели се определят чисто визуално и експертно, в настоящата разработка е използвана модифицирана скала за GSI (Sönmez, Ulusay, 1999), където отделните характеристики се определят по числени процедури.

Степента на напуканост на масива е представена от показателя SR (Strucutral Rating – структурен коефициент), като той се изчислява количествено по данни за показателя J_V (брой пукнатини в 1 m^3 от скалния масив). Определянето на този показател изисква познаване на системите пукнатини в масива и тяхната средна гъстота. Тъй като диференцирането на групите пукнатини по извадената ядка не е възможно, определянето на този показател по данни от RQD е направено по следната формула (Palmstrom, 2005):

$$RQD = 110 – 2,5\ J_V$$

Преизчислената обратна връзка между показателите е:

$$J_V = (110 – RQD)/2,5$$

Определянето на показателя SR в посочената модифицирана скала става по формулата:

$$SR = -17,5\ \ln(J_V) +79,8$$

Доколкото определянето на SR е свързано с поредица косвени (емпирични) преизчисления, в крайните резултати се установяват някои особености, които трябва да се имат предвид при тяхната интерпретация. За граничните стойности на RQD=0 и RQD=100%, съответните стойности на J_V са съответно J_V=13,4 и J_V=48,4. Това ограничава стойностите на GSI в границите от около 10 до около 65-70, което основно води до подценяване на качеството на масива при по-високите стойности на RQD. В този смисъл, направените по-долу оценки за GSI имат консервативен характер за по-здравите зони от скалния масив.

Състоянието на пукнатините в масива е характеризирано с показателя SCR (Surface Condition Rating – Коефициент на състоянието на стените на пукнатините), който е сума от стойностите на следните показатели (rating) – грапавост на пукнатините (Rr – Roughness ratio), изветряне по пукнатините (Rw –Weathering rating) и вид на запълнителя (Rf – Infilling rating) в пукнатините:

$$SCR = Rr + Rw + Rf.$$

Категориите на отделните показатели се определят визуално, съгласно Bieniawski (1989).

На базата на данните от визуалното описание на състоянието на пукнатините от сондажната ядка за основните скални формации и структурно-нарушените зони и свързаните с тях вторични променисаопределени интегралните характеристики на състоянието на пукнатините за отделните скални инженерногеоложки разновидности, като стойностите на съответните коефициенти (рейтинги) са представени в таблица 1.

Доколкото структурно нарушените зони и свързаните с тях вторични промени в скалите се различават от тези на основната скална разновидност и контролират свойствата на значителни по обхват зони от скалния масив, за тях също са направени самостоятелни оценки на състоянието на пукнатините. Резултатите са представени в таблица 2.

Таблица 1.
Категоризиране на показателите за състоянието на пукнатините (SCR)

Коефициент на състоянието на стените на пукнатините (SCR)	
Стойност	Инженерногеоложка разновидност
	Тросковски амфиболити и гнайси
Максимална	16
Минимална	8
Средна	**11,5**

Таблица 2.
Категоризиране на показателите за състоянието на пукнатините за основните типове структурни нарушения

Коефициент на състоянието на стените на пукнатините (SCR)				
Стойност	Инженерногеоложка разновидност			
	Окварцени и фелдшпатизирани скали	Хлорит-епидотови скали	Тектонити (катаклазити и милонити)	Пластични тектонити (очни гнайси)
Максимална	11	8	9,0	9,3
Минимална	9	4	6,0	6,3
Средна	**10**	**6**	**7,5**	**7,8**
	Средно за масива			
Максимална	7,8			
Минимална	4,0			
Средна	**11,0**			

Таблица 3.
Обобщените резултати от изчисленията за показателите RQD и GSI

Показатели		RQD	GSI		
ИГР	Обхват		Средно	Мин.	Макс.
Тросковските амфиболити и гнайси (TraPt3)	масив	29,4	33,8	25,9	44,6
	тунел	37,8	35,9	28,5	44,5

За стойностите за показателя SCR, определени за скалите, се приема, че характерзират основно по-слабо нарушената част на масива, която може да се характеризира със стойности на RQD>50% (добро качество на масива) и стойности на SR>22,8. Съответните стойности за структурно-нарушената част на масива, се приема, че характеризират зоните с RQD<25% (много лошо качество на масива) и SR<17,0.Тези граници, както и среднитестойности за масива, са показани на фигура 3.

Получените резултати съгласно изложената по-горе методика, са представени в таблица 1 и 2, като са използвани за определянена показателите GSI.

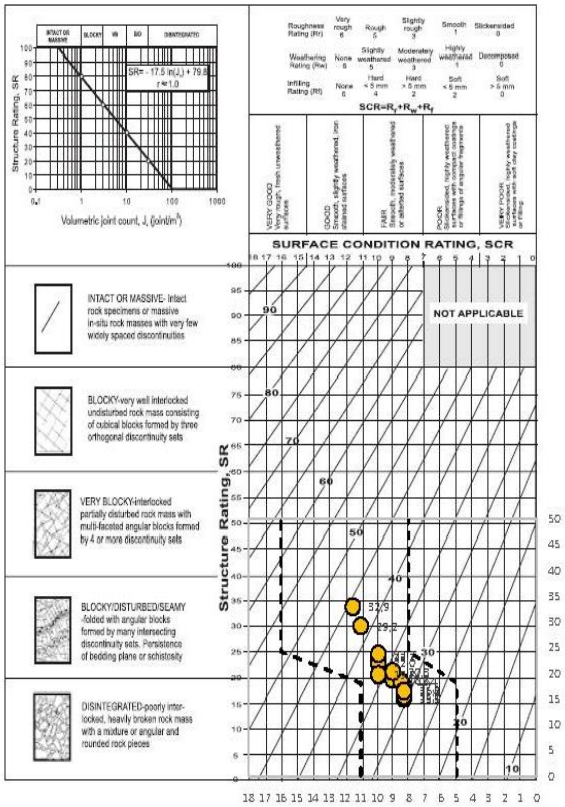
Обобщените резултати са представени на фигура 3 и в таблица 3.

Количествени показатели за свойствата на скалния масив

Количествените показатели за характеризиране на геотехническите свойства на масива са определяни чрез:

- Лабораторни изследвания на скални проби от сондажната ядка;
- Полеви еластиметрични изследвания в сондажите;
- Сеизмичен каротаж в сондажите.

Обобщените резултати от лабораторните и полеви изследвания на отделните инженерногеоложки разновидности са представени в таблица 4.



Фиг. 3. Модифицирана скала за определяне на GSI (*noSönmez и Ulusay, 1999).*

Изводи и заключения

Направеният анализ на отделните елементи, характеризиращи геотехническите условия, позволява да се направят следните изводи:

- Съвременните геолого-тектонски условия са основен елемент, определящ инженерно-геоложките, хидрогеоложкитеи геотехническите условия. Независимо от сравнително еднородния геоложки строеж (амфиболити и гнайси), тектонското развитие е довело до образуването наголеми участъци с интензивно катаклазирани и милонитизирани амфиболити. Разрезът е нарушен от няколко големи разломни структури и множество по-малки сателитни или оперяващи на тях. Скалният масив е интензивно деформиран, като деформациите са свързани не само с регионално разломяване, но и с гънковите деформации. Това се дължи на редуването в разреза на компетентни (устойчиви) гнайси и амфиболови гнайси и некомпетентни (неустойчиви) амфиболити, което е предпоставка за образуването на дисхармонична нагънатост;
- Скалният масив е с различна степен на напуканост и проницаемост. Стойностите на коефициента на филтрация, определени от опитните водонагнетявания и водоналивания, са разположени в диапазона между 10^{-5} m/d и 10^{-1} m/d, а средната му стойност е k = 0,011 m/d, т.е. комплексът се характеризира с относително ниска водопроницаемост;

- Единичният приток (на 1m) варира между 0,09 и 0,26(m3/d)/m, като средната му стойност 0,15 (m3/d)/m=150 (l/d)/m ≈ 0,00174 l/s на m. Следва да се отбележи, че независимо от общо взето невисоката водообилност на масива, има участъци, които трябва да се преминават с повишено внимание, тъй като в тях не са изключени по-високи водопритоци от указаните. Такива участъци могат да бъдат: а) местата в близост до големите разломи; б) участъците, където тунелът минава на малка дълбочина под някои по-големи дерета – обрушванията и напукването на скалите от взривните работи тук може да доведе до увеличен водоприток от съответната река;
- Геотехническите условия в зоната на тунел Железница са сложни и в значителна степен неблагоприятни. Това се дължи основно на значителната степен на структурна нарушеност. Структурните нарушения (разломи, катаклазни зони, напуканост) са преобладаващо със стръмно западане, с различна честота и издържаност.Съгласно преобладаващите стойности на показателя RQD, неговото качество се изменя от „много лошо“ до „лошо“;
- Сеизмотектонските условия са едни от най-неблагоприятните и опасни за строителство на територията на България.

Таблица 4.

Обобщени резултати от лабораторните и полеви изследвания

Показатели		Тросковски амфиболити и гнайси		
ЛАБОРАТОРНИ		**Мин.**	**средно**	**Макс.**
Обемна плътност	ρ_n (g/cm^3)	2,19	2,65	3,13
Специфична плътност	ρ_s (g/cm^3)	2,70	2,92	3,18
Обем на порите	n (%)	0,65	9,45	23,69
Порен коефициент	e (-)	0,01	0,11	0,31
Якост на едноосов натиск в сухо състоянние	$R_{н.о.}$ (MPa)	0,30	11,7	57,9
Якост на едноосов натиск във водонапито състоянние	$R_{н.в.}$ (MPa)	0,19	3,69	24,0
Якост на опън сухо състоянние	$R_{оп.}$ (MPa)	0,17	2,00	4,86
Триаксиален опит в камера на Hoek	c (MPa)	2,20	8,60	15,0
	ϕ (º)	38,7	41,72	44,74
Коефициент на Поасон	μ (-)	0,01	0,15	0,38
Модул на еластичност	E (MPa)	3462	26774	84150
ПОЛЕВИ				
Еластиметричен модул	E_0 (MPa)	170,9	1128,3	2941
Скорост на надлъжни вълни	V_P (m/s)	1640,21	2524,19	4187,36
Скорост на напречни вълни	V_S (m/s)	856,35	1318,45	2209,03
Динамичен коефициент на Поасон	$\mu_Д$ (-)	0,27	0,31	0,38
Динамичен модул на Юнг	$E_Д$ (MPa)	4516,79	12079,4	33747,5

Литература

Bieniawski, Z.T. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York,Wiley,1989.

Marinos, P., E.Hoek. A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. - *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia, Technamic Publishing Co. Inc*., 2000. - 1422-1440.

Palmstrom, A.Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). - *Tunnels and Underground Space Technology*,*20*, 2005. - 362-377.

Shanov S., N. Dobrev. Tectonic stress field in the epicentral area of 04.04.1904 Kroupnik Earthquake from strea on slickensides. Geodynamic Investigations on the Territory of Bulgaria. Investigations of the Krupnik-Kresna Region Related to the 1904 Earthquake. - *Reports of Geodesy. Warsaw University of Technology*, *4 (48),* 2000. - 117-122.

Sönmez, H., R.Ulusay. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (36), 1999. - 743-760.

Vrablianski, B. Main lines of tectonic activition of the Earth's crust in Bulgaria during the anthropogean. - *C. R. Acad. Bulg. Sci., 27, 7*,1974. -953-956

Фондови материали

Желев, В. и др. *Доклад за извършената картировка на тунелите в участък «Кресна» на автомагистрала «Струма»*. – Геофонд на «Геотехника АБС» ООД.2014.

Милованов, П., И. Петров, В. Вълев, А. Маринова, И. Климов, Д. Синьовски, М. Ичев, С. Приставова, Е. Илиева, Б. Банушев. *Обяснителна записка към Геоложка карта на Република България в мащаб 1:50 000. Картен лист К-34-82-Г (Берово) и К-34-83-В (Кресна)*. С., Консорциум Геокомплекс. 2009.

Стойнев, С. (ред.), *Геотехнически проучвания на АМ „Струма“, участък „Благоевград – Сандански“ – ЛОТ 3.2. – тунел „Кресна“*, Геофонд на «Геотехника АБС» ООД.2015.

Шанов С., Добрев Н. и кол. *ДОКЛАД по Договор № 458/2009 между Геологическия институт при Българска академия на науките и “Булгартрансгаз” ЕАД: Определяне на геоложките опасности в най-уязвимите участъци на Националната газопреносна мрежа*.2009.

Статията е рецензирана от проф. д-р Венелин Желев и препоръчана за отпечатване от кат. „Хидрогеология и инженерна геология.

ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 59, Св. I, Геология и геофизика, 2016
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 59, Part I, Geology and Geophysics, 2016

ГЕОДИНАМИЧНО СЪСТОЯНИЕ НА СВЛАЧИЩЕТО В СЕЛО ПЛЕТЕНА, ОБЩИНА САТОВЧА, БЪЛГАРИЯ

Стефчо Стойнев, Антонио Лаков

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; tony_ lakov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Свлачищата са едно от най-разпространените физикогеоложки явления и процеси в Западните Родопи. Планинските стъпала и долинни склонове, на много места са засегнати от свлачищни процеси, които в по-голямата си част са древни. В редица райони, части от тях са активизирани от съвременни свлачищни процеси, като те засягат както инфраструктурата на района, така и сгради и съоръжения в населените места. Едно от най-големите съвременни и активни свлачища в района, е това в село Плетена. То е формирано в долната част на древен свлачищен циркус и е разрушило инфраструктарата и жилищни и стопански сгради в селото. В статията са представени резултатите от неговото проучване, анализ на съвременното състояние на свлачището, механизма и динамиката на резвитието му. Резултатите от стабилитетните анализи са използвани за определяне вида и параметрите на укрепителните съоръжения.

GEOTECHNICAL CONDITIONS OF THE LANDSLIDE IN PLETENA VILLAGE, SATOVCHA MUNICIPALITY, BULGARIA

Stefcho Stoynev, Anotnio Lakov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; stoynev_geot@mgu.bg

ABSTRACT. The lanslides are one of the most common geological hazards in the West Rhodopa Mountain. They had affected mostly the mointain steps and slopes and are with ancient origin. In many areas they are currently re-activated and impact the local infrastructure, civil buildings and strucutres. One of the most recent and acvtive landslide is that in the area of Pletena village. It is formed in the down-scirts of an ancient slope body and has affected the streets, houses and outbuildings. This article presents the results from its geotechnical investigation, analyses its actual condition, mechanism and dynamics of development. The slope stability analyses are used for defining the type of the stabilization structures.

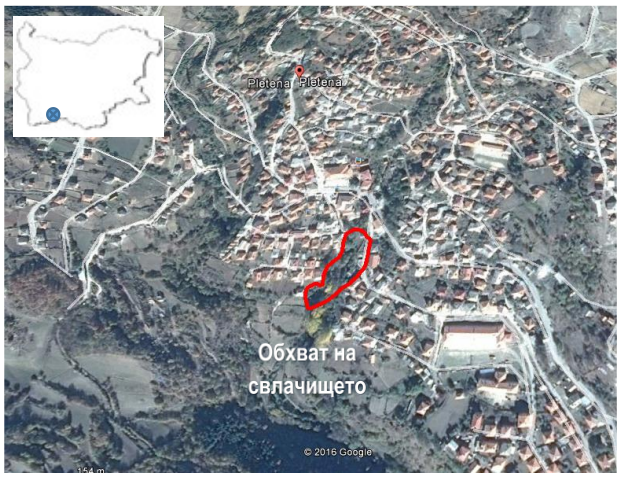
Въведение

Село Плетена се намира в югозападна България и е част от Община Сатовча, област Благоевград. Релефът на района е върху средно- до високопланински структурно-денудационен тип и включва разломни склонове със стъпални денудационни нива. Почти повсеместно наклонените терени са засегнати от ерозионни процеси, предизвикващи от ровини и сипейно-срутищни до свлачищни. Разглежданото свлачище е възникнало в началото на 2015 г. и с площ около 3,8 дка. То е засегнало кв. 33 на с. Плетена, вкл. ремонтирана улица, имоти със стопански и жилищни сгради (фиг. 1). Проучването от м. юли 2015 г. включва детайлна инженерногеоложка и хидрогеоложка картировта на терена, 5 бр. сондажи, 3 бр. електротомографски профили и комплекс лабораторни изследвания (Стойнев, 2015), като данните са използвани при съставяне на настоящата статия.

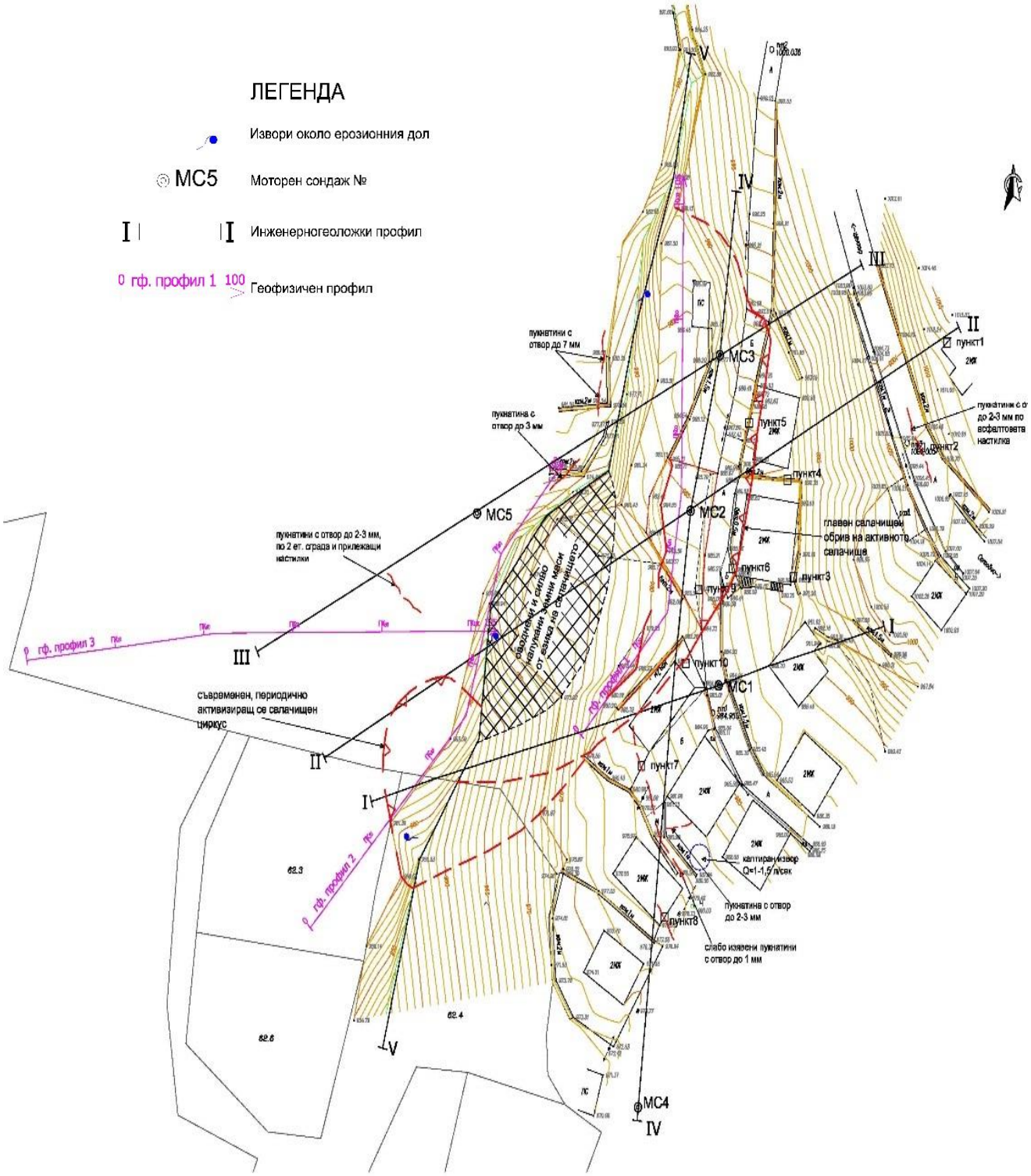
Геоморфоложка характеристика и геоложки строеж

Село Плетена е разположено върху левия долинен склон на речен приток на р. Бистрица, минаващ западно от старата част на селището. Реката тече в субмеридионално направление, като оттокът ѝ южно от село Плетена се влива в р. Бистрица.

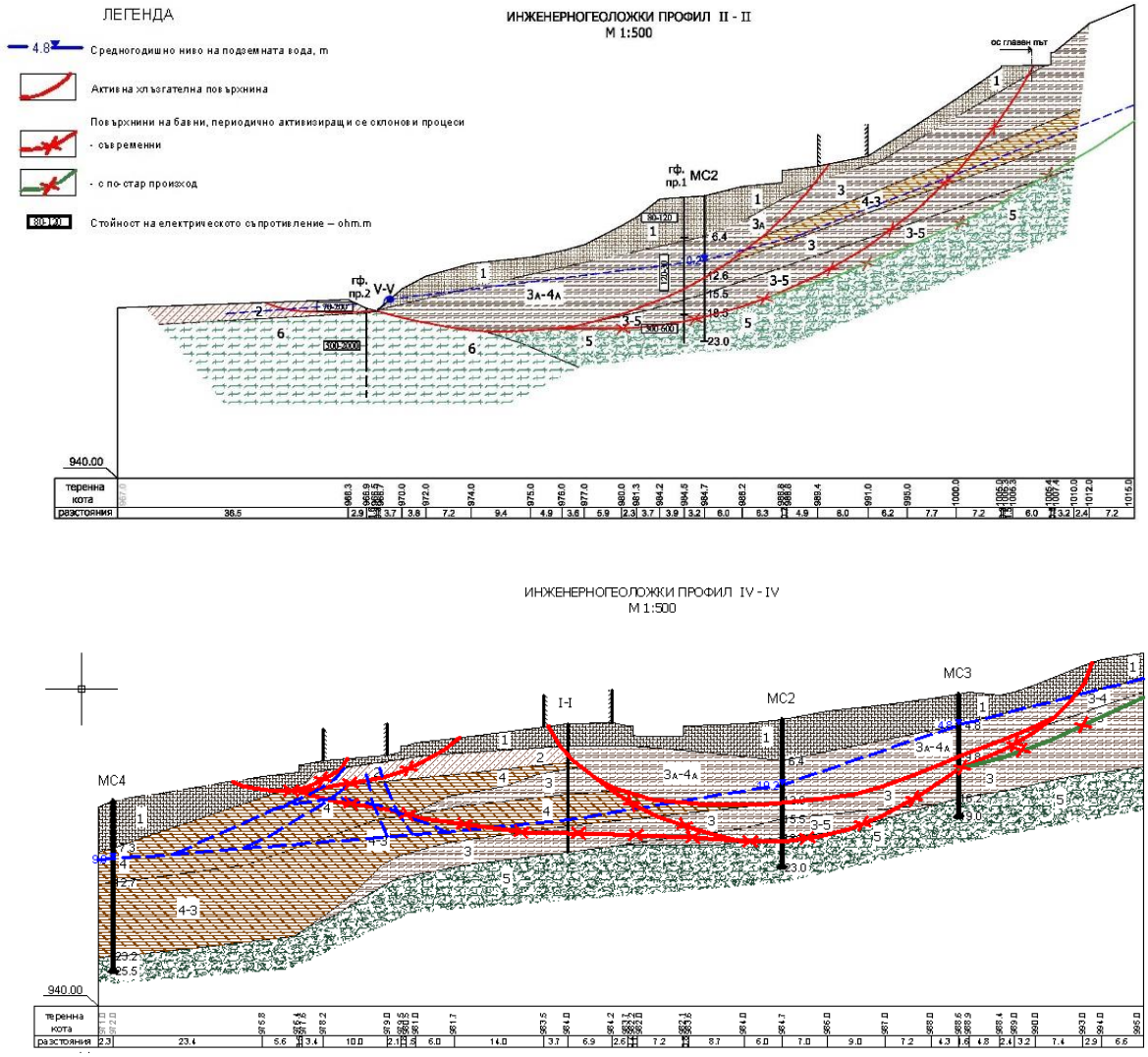
Геоложкият строеж в района е изграден от метаморфни скали на Докамбрий – Родопска надгрупа, представени от материалите на Въчанска пъстра свита включваща амфибол-биотитови, биотитови и двуслюдени гнайси, гнайсошисти, мрамори и амфиболити, както и интрузии от порфироидни биотитови гранити.



Фиг. 1. Географско местоположение на обекта



Фиг. 2. Ситуация на терена с граници на свлачището и разположение на проучвателните работи



Фиг.3. Инженерногеоложки разрези II-II през централната зона на свлачището и IV-IV през главния свлачищен отстъп. (Индексите на пластовете са посочени по-долу)

Значителната тектонска обработка на слоестия амфиболитов и гнайсов комплекс е създало предпоставки за всичане на речното русло и развитие на екзогенни процеси по неговите склонове, както и формиране на тясна и тънка акумулативна тераса. Бреговете са засегнати предимно от линейната ерозия, с обособяване на различни по обхват и дълбочини оврази и дерета, като същият процес е допринесъл и за възникване на древни свлачищни процеси, засегнали не малка част от землището на с. Плетена.

Хидрогеоложки условия

В склона е формиран общ безнапорен (грунтов) водоносен хоризонт. Той се подхранва както от пряка инфилтрация на повърхностни води, така и от води, постъпващи частично от гнайсите и амфиболитите на скалната подложка. Подземните водни нива залягат най-плитко в северната част на участъка, към десния борд на свлачището на дълбочина 5,30 m от терена (МС3). В южна посока, ерозионният дол вдълбочава талвега си и дренираща се в него подземна вода понижава пиезометричното си ниво на дълбочини от 10,2 m (МС2) до 14,8 m (МС1). В основата на свлачището са формирани 3 малки низходящи извора с малък дебит, които се дренират в речното корито. Подземната вода е хидрокарбонатно-нитратна (сулфатна) – калциева вода и не е агресивна към всякакъв вид водоплътен бетон.

Геодинамична характеристика

Съвременното свлачище е развито върху ниската част на древния свлачищен склон, развит по левия долинен склон на реката. Средният наклон на терена е 16-17°. Активните движения са се реализирали в ЮЮЗ посока (фиг. 2). Част от главния обрив на свлачището е засегнал половината от асфалтовия път, като е реализирано пропадане на настилката с денивелация около 150 cm. За сравнително кратко време този процес се е разширил в източна посока, като главният обрив е обхванал цялата ширина на пътя, вкл. и циментови огради, настилките и прилежащите западни стени на две двуетажни сгради, като възникналата пукнатина е със ширина до 10-15 cm. Теренната деформация по десния борд на свлачището е

слабо проявена и включва незначително напукване на обработваем терен. Левият борд е по-ясно изразен, като в началната си част той следва западната стена на двуетажна сграда нас пътя, която е най-много засегната от разглежданите съвременни свлачищни процеси. След преминаването през улицата, в стръмната част на левия склон на дола, той се проследява по-трудно, поради залесеността на терена, от една страна, и покриването му от обрушени материали по високите брегове на реката, от друга. Свлачищната морфология се характеризира с релефни форми, свързани със древните и съвременни свлачищни процеси, напукали, денивелирали и разуплътнили тези сектори на долинния склон. Езикът на свлачището е добре изразен (по-точно голяма част от него), като вкючва консистентно изтичане на силно напукани, леко раздути и оводнени земни маси, които опират в талвега на ерозионния дол.

Дебелината на активното свлачищното тяло по основния (централния) профил II-II е 12-13 m (фиг. 3), като съответно изплитнява към бордовете. По начин на възникване, свлачищният процес е детрузивен, свързан с водонасищане на склоновия участък. Активното съвременното свличане е от инсеквентен тип, като образува хлъзгателна повърхнина от кръгово-цилиндричен тип завършваща в ерозионния дол. То е наложено върху по-дълбоки зони на бавното пълзенеq с движение и формиране на хлъзгателни повърхнини и зони от транслационен и кръгово-цилиндричен тип. Тези деформации са от консеквентен тип на хлъзгане на по-силно изветряла и нарушена зона върху условно по-свежа скална подложка.

В терена над активния циркус, само при чувствително водонасищане на склоновия участък, се осъществяват бавни деформации, привързани към нарушените зони от древните свлачищни процеси дълбочини до 18-20 m от терена, които са формирани в слабите нашистени слоеве от различно изветрели амфибол-гнайсови шисти и окварцени амфиболити (в зони до глини с чакъли и скални късове). Установените по време на проучването (11 дни) чрез ръчни измервания на временни марки, хоризонтални отваряния по пукнатини в 10 пункта в района на свлачището показаха скорост на преместванят при главния обрив (пунктове 5, 6, 9 и 10) от 0,18 mm/д и съответно 0,10 mm/д за пунктовете извън активното свлачищно тяло (фиг. 2).

Проучването е проведено през период с отсъствие на валежи, което показва, че през подобни периоди склонът заедно със свлачищно тяло се придвижва много бавно или периодично с равномерна скорост. Същевременно, през влажни периоди (снеготопене) може да се очаква, че преместванията на активния циркус ще се реализират с по-висока скорост и амплитуди, свързани с отваряне на нови пукнатини.

Причините за свлачищните процеси обикновено имат комплексен характер, включващ няколко взаимно допълващи се фактори:

- *геоложкият строеж и първичната нарушеност* на земната основа от древните свлачищни процеси, както и от по-съвременните. Не малка част от квартала е изградена върху стар, условно стабилизиран свлачищен терен;
- *ниската якост на гнайсошистите.* Тя е определена от тяхната текстура, напуканост и промяна, в следствие на изветрителните и гравитационни процеси в миналото;
- *формираните подземни води в масива*. От една страна, те влияят съществено върху свойствата на изветрелите и с нарушена структура гнайсошисти от свлачищното тяло, които при водонасищане проявяват свойства, близки до тези на пластичните глини. От друга страна, те създават значимо увеличаване на порното налягане в дисперсните и скални разновидности, водещо до допълнително намаляване на съпротивленията на срязване в склона. Локалните частични водонасищания на чакълестите глини и гнайсошистите довеждат земната основа до бавни деформации, под формата на циклично пластично течене с ниска, но постоянна скорост. Последното съществено водонасищане на земната основа (през м. февруари 1015г.), е предизвикало последното активизиране на свлачищния процес.
- *техногенни фактори*, свързани с авариите от водопроводната мрежа и инфилтрацията на отпадна вода в земната основа от канализацията. Това е утежняващ фактор, който бавно водонасища свлачищната среда и реално намалява с времето устойчивостта на склона.

Съгласно Наредба № 01/12 свлачището са класифицира към II^{ри} клас, група 5, категория В.

Инженерногеоложка характеристика

В геоложкия разрез на свлачището се поделят следните инженерногеоложки разновидности:

- *Пласт 1* - насип от чакълеста глина със скални късове, разуплътнен, влажен до оводнен. Изпълнен е при вертикалната планировка на терена. В челото му насипните материали са влажни, а към дола (езика) на свлачището насипите са силно влажни до оводнени.
- *Пласт 2* - чакълеста глина до чакълесто-песъчлива глина, ръждивокафява до зеленикавокафява. Произходът ѝ е делапсивно-делувиален, свързан с реализираните стари свлачищни процеси в района.
- *Пласт 3* - различно изветрели, глинясали амфибол-гнайсови шисти и окварцени амфиболити, сивокафяви. В пласта преобладават слабите, размекващи се скали. Произходът на пласта е делапсивно-делувиален, като в по-горните слоеве включва полускални пакети от силно изветрели метаморфни скали, напукани, преработени в зони от старите свлачищни процеси до чакълести глини със скални късове и блокове. Устойчивостта на свлачищния склон, в голяма степен, зависи от якостното поведение на тази разновидност (фиг. 3).
- *Пласт 4* - варовити чакълесто-песъчливи глини, твърди, червеникавокафяви и ръждиви, включват се на места и блокове от мрамор. Този пласт е с тектонски произход, свързано с разседна зона в района на свлачището, както и стари колувиални процеси.
- *Пласт 5* - амфиболити, окварцени и амфибол-гнайсови шисти, мусковит-биотитови шисти, които са изветрели и напукани. Включват се скални зони от

размекващи се скали, с ниска здравина, и в по-малък процент малко до средно здрави скали.

- *Пласт 6* - окварцени амфиболити, тъмносивозелени, и светли гнайси, с малък процент амфибол-гнайсови шисти. Преобладават средно здрави, неразмекващи се скали.

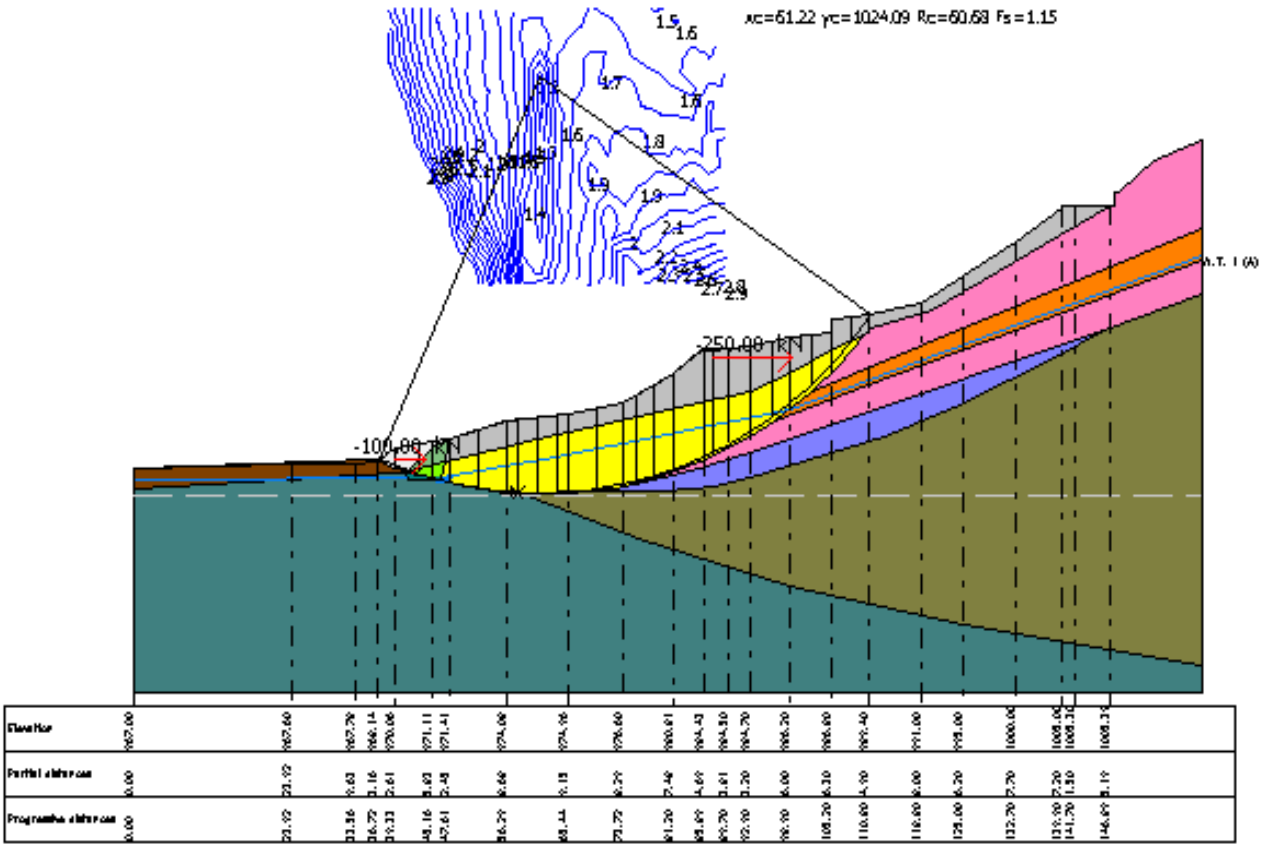
Физикомеханичните показатели на поделените инженерногеоложки разновидности са дадени в таблица 1.

Таблица 1.

Физикомеханични показатели на инженерногеоложки разновидности

ПОКАЗАТЕЛИ		Пластове №					
		1	2	3	4	5	6
Обемна плътност	ρ_n, g/cm^3	2,09	2,0	2,15	2,20	2,45	2,70
Водно съдържание	Wn, %	22,7	17,5	-	-	-	-
П-л на консистенция	Ic	0,45	1,00	-	> 1	-	-
Върхова якост на срязване (характеристична)							
Ъгъл на вътр. триене	φ_k, °	-	14,0°	19,0°	26,0°	15,5°	25,0°
Сцепление кРа	C_k, kPa	-	9,9	30,7	29,5	75,3	75,0
Остатъчна якост на срязване (характеристична)							
Ъгъл на вътр. триене	φ_k, °	-	13,5°	18,0°	25,5°	15,5°	23,0°
Сцепление кРа	C_k, kPa	-	6,2	24,2	23,2	71,9	75,0

Забележка: Характеристичните стойности на показателите на якостта на срязване са получени чрез математико-статистическа обработка на резултатите от плоско срязване, в апарат тип „Тейлър“ в консолидирано-дренирано състояние.



Фиг. 4. Устойчивост по профил II-II, с контрафорсен насип и дренажни ребра и противосвлачищни сили, особено съчетание на товарите, метод на Спенсър.

Оценка на устойчивостта на свлачището

Устойчивостта на склона е изследвана на софтуерен продукт Slope V.2009.0 на фирма Geostru Software. Стабилитетните изследвания са направени в съответствие с изискванията на Наредба № 01/12 (като по-консервативна за конкретния случай). Използван е методът на Спенсър по кръгово-цилиндрична форма на моделираните хлъзгателни повърхнини, привързани към геометрията на установените в масива.

Стабилитетните анализи са извършени при три състояния на масива:

- устойчивост при естествено (установено при проучването) състояние на масива, при основно съчетание на товарите;
- устойчивост с укрепителни и отводнителни мероприятия, моделирани като стабилизиращи хоризонтални сили и прогнозни понижени нива на подземните води в склона, при основно съчетание на товарите;
- както по-горе, при особено съчетание на товарите. Референтното сеизмично удскорение е определено съгласно Националното приложение ктъм Еврокод 8 (2012) за 475-годишен период – aR=0,15g.

За материалите от свлачищното тяло са използвани характеристичните остатъчни якостни показатели, а в дълбочина за основните пластове 5 и 6 - съответните върховите характеристични показатели.

При изчисленията за централната, най-активна зона от свлачището по профил II-II, за първото състояние е получен коефициент на устойчивост F=1,06. Той съответства на установеното при проучването временно устойчиво състояние малко над граничното, свързано с частично отцеждане на водата от максимално водонаситеното свлачищно тяло. При изчисленията за другите две състояние се оказва, че меродавно (по-неблагоприятно) е оразмеряването при особено съчетание на товарите. За достигане на минимално допустима стойност за определената класификация на свлачището F_{min}=1,15 е необходимо укрепителната сила в обхвата на пътя с интензивност 250 kN/m, а съоръжението с контрафорсния насип за корекцията на дола, трябва да поеме задържащо усилие с минимална стойност 100 kN/m (фиг. 4). Предвиждат се и дренажни ребра за понижение на нивото на подземната вода в тази зона. При тези условия, коефициентът на устойчивост второто състояние е F=1,48 > F_{min}=1,25.

Заключение

Направеният анализ на съвременното геодинамично състояние и резултатите от проведените стабилитетни изчисления показват, че свлачището изисква изпълнение на укрепителни мероприятия, включващи корекция на ерозионния дол с вертикална планировка и конструктивни силови задържащи укрепителни системи.

Стабилизирането на склона по дълбоките повърхнини е най-подходящо да се изпълни с корекция на дола и изграждане на затежняващ насип и дренажни ребра в ската към основното активно свлачище.

Укрепителната силова конструкция следва да се разположи по пътя и откъм западната страна на сградата, засегната от левия борд на активния циркус. Пилотите следва да се запънат в по-здравите скални нива на пластове 5 и 6.

Литература

Еврокод 8: *Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия.* Национално приложение EN 1998-1/NA. Март 2012.

Наредба № 12 от 03.07.2001 г. за проектиране на геозащитни строежи, сгради и съоръжения в свлачищни райони. Държавен вестник, брой: 68/2001 г.

Фондови материали:

Стойнев, С. и др. *"Укрепване на свлачище – инженеринг/проучване, проектиране и укрепване/ в кв. 33 село Плетена, община Сатовча, част: инженерногеоложо проучване"* – Геофонд на «Геотехника АБС» ООД. 2015.

Статията е рецензирана от проф. д-р Стефан Димовски и препоръчана за отпечатване от кат. „Хидрогеология и инженерна геология".