

## Изследване генезиса на пукнатините в пещера „Орлова чука“, Русенско

*Йордан Евлогиев, Петър Карачоров,  
Марко Тодоров, Добрил Христов*

Evlogiev, J., P. Karachorov, M. Todorov, D. Hristov. 1997. Study of the genesis of fractures in the Orlova Chuka cave, Rousse region — *Eng. geol. and hydrogeol.*, 24,33-39.

The main goal of this study is the genesis of fractures of the limestones of the Orlova chuka cave. An estimate of the natural static stress is made in a representative gallery cross section using the finite elements method. The following data is used: orientation of fractures, strengths and strain of limestones, geometry, load and stress of the gallery. Zones of stress concentration are found, but their values are below the tensile strength of the limestones. The geodynamic processes that have followed cave formation — earthquakes and neotectonic motions — resulted in stress increase within the zones up to values exceeding the strength of the limestones. This forming of secondary epigenetic fractures in the limestones. The latter are slightly corroded, with sharp walls open up to 2–3 mm and are distinctive from the tectonic genetic fractures which were determinating of the cave forming.

*Address:* J. Evlogiev, P. Karachorov — Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Geology, 1113 Sofia; M. Todorov, D. Hristov — Angel Kanchev Technical University, Rousse 7004.

По-голяма част от предлъсовата подложка в Русенско е изградена от аптски варовици с разнообразен фациес. В тях са всечени речните тераси на р. Дунав, р. Русенски Лом и р. Черни Лом. Те маркират евстатичните колебания на тези реки в зависимост от промените на климата през плиоцена и плейстоцена. Нивото на подземните води е следвало тези колебания, така че когато водите на реката моделират дадена речна тераса, по същото време подземните води образуват във варовиковия комплекс хоризонтален карст на същата височина. Карстовите форми са се развивали главно по тектонски пукнатини. След образуването им комплексът, в който са вместени, е подложен на геодинамични процеси — земетресения и неотектонски движения. Това неминуемо е довело до образуването на нови пукнатини във варовиковия комплекс, както и по стените на пещерите. Те са се проявили в участъците с най-добре развити зони на напрежения, които в даден момент са станали по-големи от граничната якост на варовиците. Двата типа пукнатини — генетични, по които са образувани подземните карстови форми, и епигенетични, образувани от появилите се напрежения във варовиковия комплекс около карстовите кухни под въздействие на геодинамични процеси, се различават по елементите на залягане, степен на корозирание, отвореност на пукнатините, калциране и пр.

Основна задача в настоящото изследване е установяване на естественото напрегнато и деформирано състояние във варовиковия масив по контурите на характерни сечения на галерии в пещерата „Орлова чука“ и изясняване на причините за образуване на епигенетичните пукнатини чрез метода на крайните елементи.

## Геоложка и инженерно-геоложка характеристика на района на пещерата

„Орлова чука“ е една от известните и най-добре проучените пещери в страната. Характеризира се с добре оформени и разклонени галерии и представлява атрактивен туристически обект. Образувана е в аптски варовици на относителна височина 80 m над нивото на р. Черни Лом. Масивът над нея е с дебелина от 40 до 80 m за различните ѝ участъци. Карстовите процеси са се проявили най-интензивно в участъците с високо съдържание на  $\text{CaCO}_3$  (>80 %) при подходящи климатични и хидроложки условия.

В галериите на пещерата са акумулирани два генетични типа наслаги — водногалерийни и сухогалерийни (фиг. 1). Литоложката граница между тях е и граница между геомагнитните епохи брюнес и матуяма — 0,73 млн. г. (Е в л о г и е в, Б ъ ч в а р о в а, 1993). Пещерата е образувана във времевия интервал 2,5 — 0,73 млн. г. Водногалерийните наслаги са запълвали целия обем на пещерата, но с настъпването на глациалния плейстоцен (0,87 млн. г.) горната им част е размигана. Над тази ерозионна повърхност заляга чакълест пясък с находка от *Servus* sp. Акумулираните върху тях алевролити маркират сухия период в развитието на пещерата, т. е. тя е обитаема за животинския свят от 0,73 млн. г. насам. Установяването на геоложката възраст на пещерата позволява да бъдат определени сумарните неотектонски движения за този район от времето на образуване на пещерата до днес.

Литоложкото разнообразие на аптските варовици е причина за големия диапазон на изменение на физико-механичните им свойства. В изследвания район доминираща част от седиментите на апта са представени от дебелослойни варовици с множество орбитолини в тях. Те изграждат долината на река Черни Лом. За варовиковия масив над пещерата са приети следните осреднени физико-механични показатели по литературни данни (Отчет на Лаборатория по геотехника, 1984) : обемна плътност  $2,31 \text{ g/cm}^3$ ; специфична плътност  $2,72 \text{ g/cm}^3$ ; порестост 10%; якост на срязване — кохезия  $23 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  и ъгъл на вътрешно триене  $27^\circ$ ; кубова якост в сухо и във водонаситено състояние —  $580 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  и  $516 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ; якост на натиск след 25-кратно замразяване на въздушно суха проба  $490 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ; якост на опън  $58 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ; модул на еластичност  $98 \ 000 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Водопопиваемостта достига 16—20%, а загубата на тегло след 25-кратно замразяване до 20%.

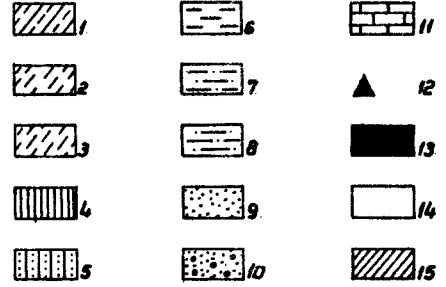
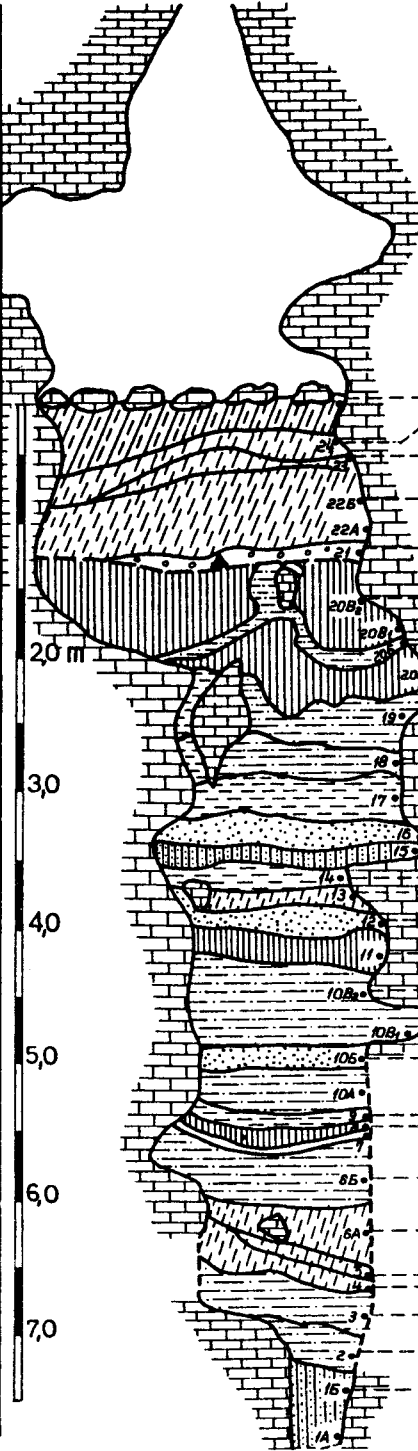
Фиг. 1. Литолого-стратиграфски разрез на седиментите от пещера „Орлова чука“

1 — алевролит, сиво-черен; 2 — алевролит, сиво-черен, здраво споен; 3 — алевролит, жълтеникав до жълтокафяв; 4 — прахова глина с червен цвят; 5 — пясъчлива глина с червен цвят; 6 — прахова глина, сиво-сивобяла, мазна; 7 — прахово-пясъчлива глина, сиво-бяла до жълто-червена; 8 — пясъчлива глина, сиво-черна; 9 — прахов дребен пясък; 10 — прахов чакълест пясък; 11 — варовик; 12 — палеонтоложка находка; 13 — нормална магнитна полярност; 14 — обратна магнитна полярност; 15 — аномална магнитна полярност. Други обозначения:  $\text{C}_{\text{org}}$  — органичен въглерод; pH

Fig. 1. Litho-stratigraphic section of the sediments of the Orlova Chuka

1 Siltstone, greyish-black; 2 — Siltstone, greyish-black, cemented; 3 — Siltstone, yellowish to yellowish-red; 4 — Silty clay, red; 5 — Silty clay, red; 6 — Silty clay, grey, greyish-white, greasy; 7 — Silty loam, greyish-white to yellowish-red; 8 — Sandy clay, greyish-black; 9 — Silty fine sand; 10 — Silty gravel sand; 11 — Limestone; 12 — Palaeontologic remains; 13 — Normal magnetic polarity; 14 — Reverse magnetic polarity; 15 — Anomalous magnetic polarity. Other symbols:  $\text{C}_{\text{org}}$  — organic carbon; pH

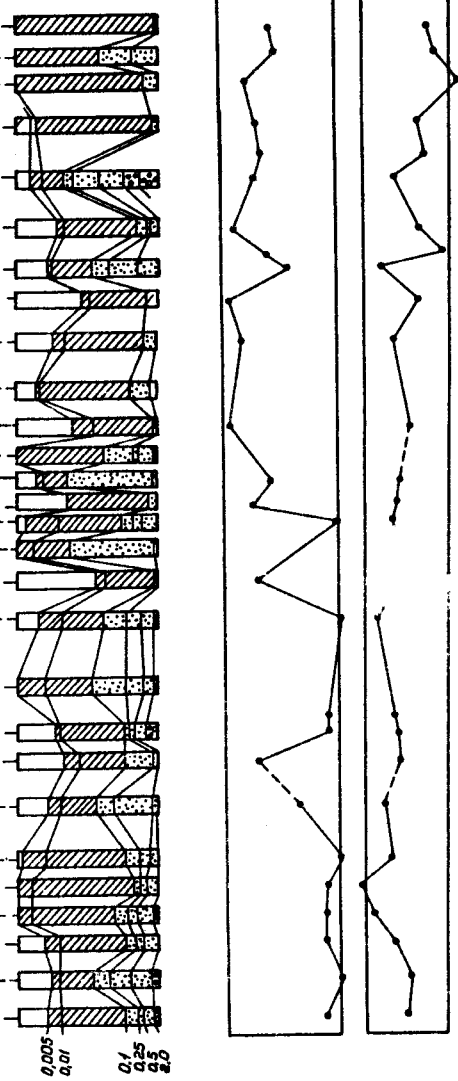
Сербия	Холоценовска	Сербия
Белгизис		Белгизис
Палеолитска		Палеолитска
Матура		Матура
Водно - галеријски отложенија		Водно - галеријски отложенија
Матура		Матура
Неваљаничен	Плейстоценовска	Неваљаничен
Сукоберијски		Сукоберијски
Гладијаничен		Гладијаничен
Бријунс		Бријунс



Гранулометрија %  
0 20 40 60 80 100

pH  
7,0 7,2 7,4 7,6 7,8

Садрж. %  
0,0 0,1 0,2 0,3



0,005  
0,01  
0,1  
0,25  
0,5  
2,0

Натоварването върху пещерата от скалния масив действа от четирите страни на отвора. В съответствие с теорията за натоварване на скални кухини (галерии) е приета методиката на т. нар. „скален натиск“. Върху отвора действа товарът на един свод от масива с определена дебелина, в случая около 2,5 m. Останалата част от масива над него предава товара си встрани чрез сводово действие. При посочените физико-механични показатели за варовиците натоварването върху галерията е не по-голямо от  $P = 0,6 \cdot 10^5$  Pa.

Районът на пещера „Орлова чука“ е със сеизмичност VIII степен и коефициент на сеизмичност  $K = 0,15$ . Освен сеизмичните въздействия тук са се проявили и интензивни неотектонски движения, в резултат на което пещерата се е издигнала над реката около 80 m за период от 730 хил. г. Това е довело до промяна в напрегнатото състояние на варовиковия комплекс и до появата на вторични напуквания. В галериите на пещерата „Орлова чука“ са измерени около 1100 пукнатини, представени графично в диаграма-роза на пукнатините (фиг. 2). Установяват се два добре изразени максимума в посоките на пукнатините —  $109^\circ/78^\circ$  SSW и  $40^\circ/67^\circ$  SE. Всъщност това са тектонски (генетични) пукнатини, по които са проникнали подземните води и са моделирали галериите на пещерата. Те обикновено са отворени до 10 cm, а в някои случаи и повече, имат заоблени ръбове на стените, силно са корозирани и се наблюдават по сводовете в най-високите части на галериите. Останалите пукнатини от диаграмата имат междинни посоки спрямо двата максимума. Тези пукнатини са по-слабо изразени, ръбовете на стените им са остри, отворени са до 2–3 mm и по всички тези белези приличат на вторични (епигенетични) пукнатини.

## Методика на изследване и резултати

На представителен разрез в пещера „Орлова чука“ е извършена оценка на естественото статично напрегнато състояние на варовиковия комплекс. Задачата е решена с помощта на метода на крайните елементи, като са използвани данни за ориентацията на пукнатините и за якостнодеформационните свойства на варовиците. Методът на крайните елементи (МКЕ) дава добра възможност за оценка на действителното напрегнато състояние на варовиковия комплекс в зависимост от натоварването и геометрията на галерията.

Изследването е извършено чрез създадената в катедра Техническа механика на ВТУ „Ангел Кънчев“ — Русе програмна система ВИМКЕ.

Използваната дискретизация е показана на фиг. 3. Прието е, че материалът от сечението се намира в условията на равнинно деформирано състояние. Достатъчно голяма околност от изследваното сечение е дискретизирана чрез общо 1421 крайни елемента. От тях 535 са триъгълни от типа RD2P и 886 са четириъгълни от типа RR2P от каталога на програмната система ВИМКЕ. Общият брой на възлите е 1289, което при две степени на свобода на възел съответства на 2578 неизвестни възлови премествания (уравнения). Приети са следните стойности на материалните константи и механични характеристики:

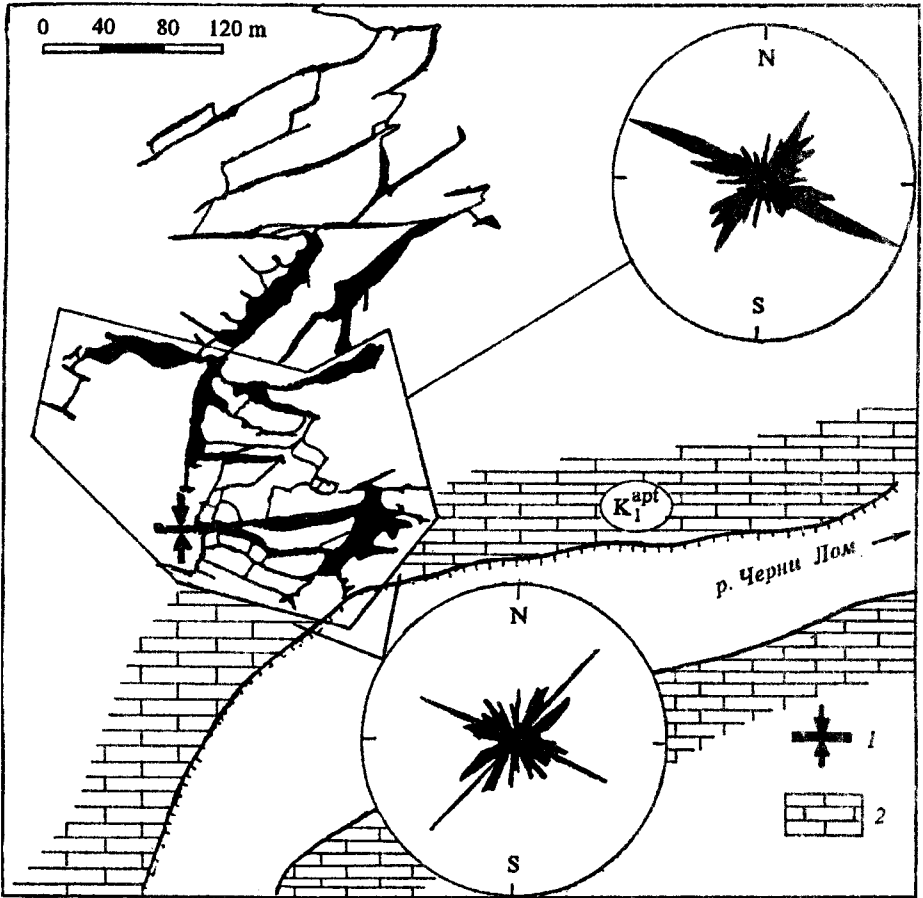
обемна плътност  $\rho = 2,31 \text{ g/cm}^3$ ,

модул на еластичността  $E = 98\,000 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,

коефициент на Поасон  $\mu = 0,18$ ,

якост на натиск  $R = 580 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,

якост на опън  $R_{\text{он}} = 58 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .



Фиг. 2. Диаграми-рози на пукнатините, измерени в галериите на пещера „Орлова чука“ и около входа

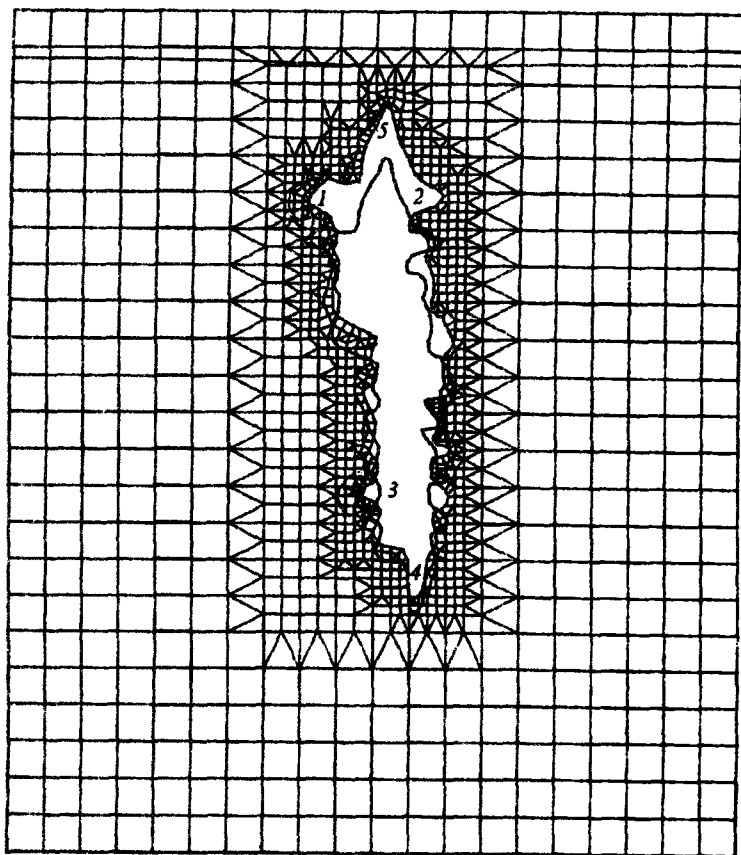
1 — изследван напречен разрез на галерия, представен на фиг. 1 и 3; 2 — варовик

Fig. 2. Rose-diagrams, of the fracture strikes in the galleries and at the entrance of the Orlova Chuka cave

1 — Investigation cross section of the gallery, presented of the fig. 1 and fig. 3; 2 — Limestone

Натоварването се дължи на собственото тегло на скалния масив над и встрани от галерията. Това натоварване се привежда автоматично от системата ВИМКЕ до еквивалентни възлови сили въз основа на зададената плътност на материала и на обема на отделните крайни елементи. Долният контур на разглежданата област е закрепен във вертикално направление, а вертикалните — в хоризонтално.

На фиг. 3 е представено деформирането на разглежданото сечение в условен мащаб при посочените инженерногеоложки условия. Анализът на напрегнатото състояние в околността на отвора показва, че най-застрашени са зоните, означени с цифрите от 1 до 5. Еквивалентните напрежения в тях, изчислени по якостната теория на Мор ( $\sigma_{\text{екв}} = \sigma_1 - k\sigma_3$ ,  $k = \frac{\sigma_{\text{в.оп}}}{\sigma_{\text{в.нат}}} = 0,1$ ), имат следните стойности:



Фиг. 3. Зони на концентрация на напрежения (1–5) във варовиковия комплекс около отвора на пещерата

Fig. 3. Zones of stress concentration (1–5) in the limestones at the cave entrance

зона 1  $\sigma_{\text{скв}} = 3,10-5,50 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,

зона 2 —  $\sigma_{\text{скв}} = 3,30-3,60 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,

зона 3 —  $\sigma_{\text{скв}} = 3,90 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,

зона 4 —  $\sigma_{\text{скв}} = 1,40 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,

зона 5 —  $\sigma_{\text{скв}} = 0,96 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

Вижда се, че и това са зони, в които съществува концентрация на напреженията. Зони 4 и 5 се намират съответно в долната и горната част на отвора, там, където той се характеризира с голяма кривина (малък радиус). Зоните 1, 2 и 3 са развити във вертикалните стени, в участъци също със значителна кривина, като 1 и 2 са в проходимата част на галерията, а 3 в запълнената със седименти. Стойностите им са значително под якостта на опън на материала ( $R_{\text{оп}} = 58 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ). В останалата част от масива стойностите на еквивалентните напрежения са по-ниски и са до голяма степен изравнени.

В очертаните зони с концентрация на напрежения съществуват добре развити пукнатини, установени от огледа на място.

## Заклучение

Въз основа на получените резултати от теренните изследвания и от математическото моделиране може да се направят следните изводи:

1. При естествено напрегнато състояние на масива стойностите на напреженията по контура на галерията във всички зони на концентрация (фиг. 3, зони 1, 2, 3, 4, 5) са по-ниски от якостните свойства на варовиците.

2. Пукнатините, по които е оформена пещерата, имат тектонски произход. Те са развити в зони 4 и 5.

3. Вторични епигенетични пукнатини се установяват в зони 1, 2 и 3, концентратори на напрежения. Образувани са през последните 730 хил. г. от проявилите се геодинамични процеси, довели до нарастване на напреженията в тези зони до стойности, по-високи от якостта на варовиците.

## Л и т е р а т у р а

- Е в л о г и е в, Й., В. Б ъ ч в а р о в а. 1993. Нови данни за геологията на пещера „Орлова чука“.  
— В: 6-а нац. конф. по спелеология, 19—20. III. 1993. София.
- G r i n d m a n, H. 1989. Finite Elemente — Anwendungen in der Baupraxis. — Ernst & Sohn, p. 576, Berlin

Одобрена на 20. XII. 1994 г.

Accepted December 20, 1994