

БИОКЛИМАТИЧЕН КОМФОРТ НА ЧОВЕКА: РИСКОВЕ И РЕСУРСИ НА ПЕЩЕРНИЯ МИКРОКЛИМАТ

*Зоя Матеева*¹

<https://doi.org/10.35101/prg-2020.3.3>

Пещерите, като един от най-важните елементи на карстовата геосистема, представляват значим интерес от гледна точка на тесен, но важен сегмент от човешки дейности, свързан с рекреацията, туризма, научните изследвания и др. Поради нарастващия интерес към пещерите и недостатъчните изследвания за тях в настоящата разработка се поставя акцент върху климата и биостатуса на човека в пещерни климатични условия и измененията на основните климатични елементи в пещерите в сравнение с местата извън тях.

Ключови думи: биоклиматичен комфорт на човека, пещерен климат, биоклиматични рискове и ресурси на пещерата, мерки за адаптация.

HUMAN BIOCLIMATIC COMFORT: RISKS AND RESOURCES OF CAVE CLIMATE

Zoya Mateeva

Abstract: The microclimatic conditions in the caves are very specific in comparison with the climate outside them. The extremes of outdoor climatic manifestations are difficult to reach inland cave spaces. Their microclimate is mainly determined by the temperature, humidity, air moving, and gas composition of the cave air. The transition between the external climate and that one inside the caves in most cases shows a significant degree of contrast. This places the thermo-adaptation system of the human organism under conditions of extreme strain and induces relevant thermo-physiological risks to humans. What is the extent of these risks and how they can be mitigated - this is a question of the present study that will be considered in the context of its bioclimatic parameterization. The purpose of this study is to

¹ Департамент География - Национален институт по геофизика, геодезия и география към Българска академия на науките; zoym@abv.bg

trace how the main climatic elements in caves change compared to places outside them, what are the corresponding changes in the human heat balance and of the complex human thermal comfort, what are the risks of cave bioclimate, and what are its resources, in terms of human bio-comfort, and of human activity in cave conditions, and what actions could be taken to reduce these risks and / or adapt to them. To achieve the set multi-layered goal, the research will go through the following 4-step methodological approach: Review of the parameters of basic climatic elements in cave conditions; Parameterization of the human body heat balance and the human thermal comfort of in cave conditions; Analysis of the risks and resources of the cave microclimate in terms of human bioclimatic comfort; Identification of a package of measures for risk reduction. The obtained results show that the specific climatic conditions of the caves contain significant resources, as well as dangers in terms of the human bio-comfort. It can be thermally influenced as well as by the properties of the air quality. Thermal comfort can benefit from the permanence of the cave bioclimate, but at the same time it can be at risk in the contrasting transition from outdoor conditions to those inside the caves, as well as in a longer stay with inappropriate clothing and exercise. The quality of ambient air can be beneficial for certain diseases by the presence of some mineral salts, minerals and gas particles, but at high concentrations, such as of CO₂, Rn et al., it can become a danger to the human organism. To optimize the use of the cave bioclimatic resources and protect the men from the risky bioclimatic potential, the work ends with offering a set of appropriate measures.

Keywords: human bioclimatic comfort, caves' climate, cave's bioclimatic risks and resources, adaptation measures.

ВЪВЕДЕНИЕ

Топлинният комфорт е важен фактор за работата на основни органи и системи на човешкия организъм и за физическия, психическия и общия биостатус на човека. Това определя значението му за редица аспекти на неговата трудова, битова и възстановителна дейност и обуславя важноста на изследване на тази тема.

Съществуват многобройни варианти на естествените и изкуствените среди, в които човек пребивава, оказващи многообразно въздействие върху неговия топлинен комфорт. Сред тях са и необичайните условия на пещерите, където комбинираният ефект от параметри на климата, модифицирани под въздействие на пещерната среда, упражнява специфично въздействие върху термофизиологичния комфорт на човешкия организъм.

Пещерите, като един от най-важните елементи на карстовата геосистема, представляват значим интерес от гледна точка на тесен, но важен сегмент от човешки дейности, включващ рекреационно-туристическа, експедиционна, проучвателна, изследователска, климато-терапевтична и др. Ето защо е важно да се знае какъв е биоклиматът, как се модифицират отделните климатични елементи, включително екстремните климатични явления, в сравнение с условията извън пещерите, доколко контрастен е преходът от външната към вътрешната, пещерна климатична среда, какъв е комбинираният ефект от въздействието на климатичните елементи в пещерни условия върху топлинния комфорт на човека, върху натоварването на неговата термоадаптациялна система и всички, свързани с нея, физиологични процеси в човешкия организъм, както и върху

взаимодействието на газовете в пещерното пространство и последващото им въздействие върху живата и неживата материя.

Тези въпроси формират една интересна и недостатъчно изследвана тема, както от теоретична, така и от практико-приложна гледна точка, и определят *предмета* на настоящото изследване – пещерният климат и биостатусът на човека в пещерни климатични условия. *Целта* на това изследване е да проследи как се изменят основните климатични елементи в пещерите в сравнение с местата извън тях, какви са съответните изменения на баланса на топлина в човешкото тяло и на комплексния термичен комфорт на човека, какви са рисковете на пещерния биоклимат и неговите ресурси от гледна точка на биоконфорта на човека и на дейността му в пещерни условия, и какви действия би могло да се предприемат за редуциране на тези рискове и/или адаптиране към тях.

МЕТОДИЧЕН ПОДХОД

За постигане на поставената многопластова цел изследването ще премине през следния 4-стъпков методичен подход:

– Преглед на стойностите на основни елементи на климата и атмосферата в пещерни условия;

– Параметризиране на топлинния баланс на човешкото тяло и на топлинния комфорт на човека в пещерна среда;

– Анализ на рисковете и ресурсите на пещерния микроклимат по отношение на биоклиматичния комфорт на човека;

– Идентифициране на пакет от мерки за редуциране на рисковете.

Основните климатични елементи, определящи климатичните условия в пещерите, са температурата, влажността и движението на въздуха. Когато последното е слабо изразено, то има второстепенно значение за пещерния климат, но при някои пещери, които имат повече от един отвор, може да се наблюдава съществено движение на въздушния поток. Изброените климатични елементи са от основно значение за топлинния баланс на човешкото тяло, който има водеща роля за биоклиматичния комфорт на човека. Наред с изброените елементи, важно значение в пещерите има и техният газов състав.

Топлинният баланс на човешкото тяло се определя като разлика между приходите и разходите на топлина в него. За неговото параметризиране се използва следното уравнение (Havenith, Fiala, 2016):

$$M + Q + C + E + Res + Kd = \pm S,$$

където: M – метаболитна топлинна продукция (както в процеса на основния метаболизъм, така и в процеса на физическата активност на човека); Q – радиационен баланс на човешкото тяло; C – топлинен обмен чрез конвекция; E – загуба на топлина чрез изпарение; Res – загуба на топлина чрез респирация; Kd – топлинен обмен чрез кондукция (при контакта с подстилащата повърхнина); S – топлинен баланс (топлинно салдо) на човешкото тяло, т.е. промени в топлинното съдържание на тялото.

Въз основа на стойностите на топлинния баланс могат да бъдат определени следните параметри на топлинния комфорт на човека:

- Субективна (усещана) температура ($^{\circ}\text{C}$);
- Топлинно усещане (екстремно студено, много силно студено, много студено, умерено студено, хладно, неутрално, умерено топло, много топло, много силно топло, екстремно топло);
- Термофизиологично натоварване/стрес (от -4 до +4, съответно от много висок стрес при студено време до много висок стрес при топло време);
- Продължителност на времето за безрисков престой на открито (D , мин.) (при престой, по-дълъг от D , възниква риск от преохлаждане или прегряване);
- Оптимално облекло (clo) (облеклото, необходимо за поддържане на топлинен комфорт при определени условия на времето и физическата активност): 0.1 – много леко лятно облекло, 0.5 – леко лятно, 0.9 – обичайно лятно, 1.5 – пролетно или есенно, 3.0 – зимно, >4.0 – допълнително уплътнено зимно облекло;
- Оптимална физическа активност (W/m^2) (активността, необходима за поддържане на топлинен комфорт при определени условия на времето и облеклото): 40 W/m^2 – покой/сън, 55 W/m^2 – покой/седящо положение, 70 W/m^2 – покой/стоящо положение, 110 W/m^2 – бавен ход, 135 W/m^2 – умерен ход, 200 W/m^2 – много бърз ход, 210 W/m^2 – изкачване/наклон 15° , 300 W/m^2 – изкачване/наклон 30° ;
- Риск от дехидратация (нисък, умерен, висок).

РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ НА ПЕЩЕРНИЯ КЛИМАТ

Пещерната атмосфера се характеризира основно чрез параметрите на следните климатични елементи: температура и влажност на въздуха, движение на въздуха и газов състав. Ключово положение в пещерната климатология е, че климатичните параметри в пещерите са резултат от модификацията на външната топлина и влага в процеса на трансфер навътре в пещерата. При отсъствие на пренос отвън (както в затворените пещери) пещерният въздух приема термичните и влажностните характеристики на обкръжаващите скали. В противен случай движещият се в пещерата въздушен поток приема специфичен, променящ се, неравновесен профил, докато достигне равновесие с термично-влажностните характеристики на пещерните скали (De Freitas, Littlejohn, 1982, 1987). Наличието на по-големи подземни водни обекти – езера, или протичащи реки, също оказва въздействие върху температурата на прилежащия пещерен въздух и неговата влажност.

Температура на въздуха

В пещерите се наблюдават три основни термични зони: хетеротермична (близо до повърхността), преходна и вътрешна (зона на постоянните температури) (фиг. 1а и 1б). Това зонироване важи за по-дълги пещери, докато в тези, с малка дължина, климатичните зони се припокриват в по-малка или по-голяма степен. В най-отдалечения край на пещерите температурата на въздуха е сходна със средната годишна температура на въздуха отвън. Това обаче се отнася

най-вече за пещери, разположени в места с океански/морски климат. Колкото по-континентални черти има районът, в който се намира пещерата, толкова температурата на нейните най-отдалечени части е по-висока от средната годишна температура извън нея (Мавлюдов, 2008; Мавлюдов, Усиков, 1979; Дублянский, Ломаев, 1980).

Температурата на въздуха в пещерите се характеризира със следните принципни особености: тя има по-малка или почти липсваща температурна амплитуда и по-слабо изразени екстремуми в сравнение с външната температура (фиг. 2). През топлото полугодие тя е по-ниска, а през студеното полугодие – по-висока от температурата извън пещерите. Тя може да се променя бавно и плавно и когато промените извън пещерата имат екстрем и контрастен характер, вътре те са значително по-меки, а в по-отдалечените пещерни пространства почти напълно липсват (фиг. 3).

На фона на тези общи, принципни характеристики, температурата на различните пещери се специфицира в зависимост от това в коя климатична зона и в какъв тип климат – континентален или океански, се намира пещерата, на каква надморската височина е тя, какви са вътрешната ѝ денивелация и височина, експозицията на входа/входовете ѝ спрямо пещерното пространство, дължината и геометрията ѝ, доколко е продухваема и др.

Пещерите в България показват сравнително широк диапазон по отношение на средната си годишна температура. Така например в Ягодинската пещера и в Снежанка тя е около 6 °С, в Леденика и Дяволското гърло – 8 °С, Венеца – 9,6 °С, Лепеница – 10 °С, Ухловица – 10-11 °С, Голубовица – 11 °С, Магурата – 12 °С, Бачо Киро – 13 °С, Темната дупка – 11-14 °С и т.н. (Природни забележителности в България; Пещерите в България)

При едновходовите низходящи пещери през зимата охлажданият и по-плътен външен въздух измества този в пещерата и я запълва изцяло – от най-отдалечените ѝ части до самия ѝ вход. През лятото топлият въздух може да затопли само горната част на пещерата. По-ниските ѝ части се затоплят много бавно, за сметка на топлообмена със стените на галерията. Стабилизирането на този климатичен режим във времето често води до натрупване на големи количества пещерен лед. Такива пещери се наричат „пещери хладници“ или „пещери ледници“. Входовете на някои пещери през зимата се покриват със снежни тапи. При това се получават условия за възникване на т.нар. парников ефект, което повишава средномесечната им температура през зимния сезон.

При едновходовите възходящи пещери климатичната картина е противоположна. През лятото те натрупват големи количества топъл въздух. През зимата охлаждането им се получава само благодарение на топлоотдаването през стените на галериите и залите. Такива пещери се наричат топлици.

При пещерите, които имат повече от един вход, през зимата по-топлият (и по-разреден) пещерен въздух излиза през по-високия вход на пещерата, а студеният въздух отвън навлиза през по-ниския ѝ вход. През лятото по-студеният пещерен въздух изтича през по-ниския ѝ вход, а през горния вход се засмуква топъл външен въздух. Това довежда до сериозно охлаждане на ниската част на пещерната система и до нагриване на високата ѝ част. Наличието на течаща вода в зоната на отрицателни зимни температури довежда до натрупване на големи количества натечен лед. Обикновено тези натрупвания създават сил-

но охлаждане на въздуха в близост до тях, запазвайки ги като самостоятелни студогенериращи формации в продължение на много години. В подобни пещери микроклиматът се различава съществено в сравнение с този, на сухите пещери (Сб. лекции на Българската федерация по спелеология).

Влажност на въздуха

Пещерната влага се формира при инфилтрация на валежите, както и чрез кондензация на водни пари от въздуха в пещерното пространство. Генерирането на кондензационната вода в пещерата е свързано с температурните и влажностните условия на границата въздух–скала и се влияе значително от обмена на топлина и влага с външната атмосфера (фиг.4) (Wang, Wan, Huang et al., 2014).

Влажността на въздуха под земята е значително по-висока, отколкото на нейната повърхност. В много случаи тя достига 100%. Това означава, че пещерният въздух съдържа максималното количество водна пара, което може да поеме. „Излишната“ влага кондензира върху арките и стените на пещерата, откъдето капе или се стича чрез незабележими потоци към пещерните реки и езера. Кондензацията на пещерната влага е много важна за подхранване на източници, даващи начало на повърхностни потоци и реки.

Специфичната влажност на пещерата следва сезонен режим, подобен на този, при температурата на въздуха, с летен максимум и зимен минимум (De Freitas, 2010). През зимата студеният въздух извън пещерата обикновено е сух, а когато навлезе в по-топлата пещерна среда, се затопля. В резултат на това започва процес на изпарение, което води до последващо охлаждане на пещерата, поради загубата на топлина за изпарение. През лятото пещерният въздух е по-студен от въздуха навън. Когато външният въздух навлиза в пещерата, той се охлажда, което предизвиква кондензация и значително увеличаване на нивата на влажност в него, въпреки че като цяло въздухът в пещерата през лятото е по-топъл, отколкото през зимата. Средногодишната специфична влажност на пещерата е по-висока от външната влажност.

Влагосъдържанието на въздуха в различните пещери в нашия географски и климатичен пояс е в границите от 5 до 12 g/m³ (Сб. лекции на Българската федерация по спелеология).

Атмосферно налягане

Атмосферното налягане в пещерите зависи главно от структурата на пещерната геометрия и по-малко от микроклиматичните условия на пещерата. В малки и хоризонтални пещери атмосферното налягане е еднакво с външното и се променя според неговите изменения. Във вертикални пещери налягането се увеличава с дълбочина. Колебанията на външното атмосферно налягане се отразяват върху колебанията на вътрешното с известно закъснение. В широките пещери това забавяне е незначително (Мавлюдов, Усиков, 1979).

Движение на въздуха

Динамиката на пещерния въздушен поток има ключово значение за климата на пещерата. Скоростта и посоката на въздушния поток са резултат от тер-

мично обусловеното неравновесие между плътността на въздуха в пещерата и извън нея. Налице е също и ефектът на вентилация, породен от микроклиматичните различия в самата пещера, особено в недостъпни за външния въздух части от нея (De Freitas, Littlejohn, 1987). Движението на въздуха в пещерите зависи много и от морфологията на пещерата, включително от големината, формата и броя на нейните входи.

Главна причина за въздушната динамика в по-голяма част от пещерите е промяната на атмосферната плътност (налягане) на повърхността. Когато тя се увеличава, възниква въздушна тяга навътре към пещерата, а при намаляване – навън. Интензивността на тягата е малка, а коефициентът на въздухообмен (отношението между денонощния въздушен обем, преминаващ през пещерата, и нейния обем) обикновено е не по-голям от единица.

За хоризонталните пещери въздушната циркулация се характеризира със сезонен режим. През зимата студеният въздух от повърхността нахлува в пещерата, изгласквайки по-топлия вътрешен въздух през пукнатини на пещерния свод. През летния сезон картината се променя: по-малко топлият пещерен въздух излиза през входа на пещерата, а по-топлият външен въздух се просмуква към пещерното пространство през сводовите пукнатини, като при навлизането си навътре в пещерните галерии постепенно се охлажда.

Пещери, които имат два входа, или се състоят от основни галерии, съединени с повърхността чрез пукнатинната мрежа на основната скала, са с по-динамичен въздухообмен. При тях основната причина за движението на въздуха е разликата в атмосферното налягане между двата входа, намиращи се обикновено на различни нива. Скоростта на движение на въздуха в такива пещери е по-голяма - в границите 0,2–0,7 m/s а в отделни техни участъци достига 1,0 m/s и повече. Коефициентът на въздухообмен в динамичните пещери може да достигне 10–30, а в тесни пропасти (цепнатинен тип) до 70–130 пъти в денонощие. Тези пещери (от динамичен тип) крият една специфична опасност: димът от факли или огън, разпален близо до входа им, може да се окаже на стотици метри навътре по етажите на пещерата и да застраши намиращи се вътре посетители (Сб. лекции на Българската федерация по спелеология).

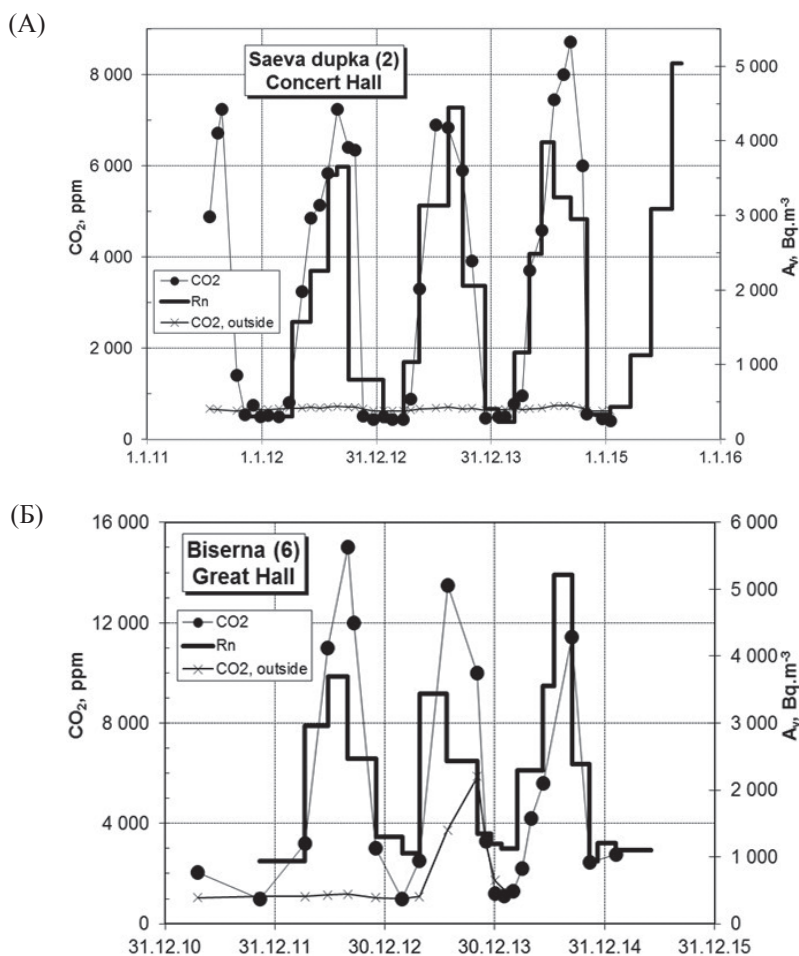
Газов състав

Пещерите имат специфичен газов състав на въздуха. В него присъства повече въглероден диоксид, азот, сероводород, радон и понякога въглеродороди от метановата група (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10}), отколкото на повърхността (Дублянский, Дублянская, 2004). В някои пещери се натрупва толкова много въглероден диоксид, че посещаването им става животозастрашаващо.

Във въздуха на повечето карстови кухни съдържанието на CO_2 е с 1-2 порядъка по-високо, отколкото в открита атмосфера (0,3-3 об. %). Повишеното съдържание на CO_2 е фонът, на който се развиват много подземни процеси (образуването на пещерни минерали, развитието на спелеофауна и др.). В някои случаи съдържанието на CO_2 може да надвишава 3 об. %, което е прагът на опасност за човешкия живот. Тъй като специфичното тегло на CO_2 е по-високо от това на кислорода, той се натрупва в ниските части на пещерите, където концентрацията му в редки случаи (при лоша вентилация на пещерната кухня)

може да бъде 6-7 об. % (напр. пещерата Пепеляшка, Украйна); 19 об. % (пещерата Калифорния, САЩ), 24 об. % (пещерата Кармал, Иран), 36 об. % (пещерата Збрашовски, Чехия) и дори 77 об. % (пещерата Канини, Италия). Пример за изследване съдържанието на CO_2 в българската пещера Съева дупка е показан на фиг. 5.

Източник на CO_2 в пещерите е окисляването в почвата на органични и неорганични съединения, разпадането на органични вещества, жизнената активност на микроорганизмите. CO_2 навлиза в пещерите от почвата, тъй като е по-тежък от въздуха, устремявайки се навътре към пещерните пространства през пукнатините, чрез инфилтрационните води, директно при притока на газ в разломни зони и др. В такива зони може да се наблюдава повишено съдържание (обикновено до 1-2 об. %) и на метан и други леки въглеводороди (Мавлюдов, Токарев, 2019).



Фиг. 5. Времени ход на концентрациите на радон (A_v) и въглероден диоксид (CO_2) в пещерите Съева дупка (А) и Бисерна (Б) (Източник: Turek, Stefanov, Svetlik, Orcikova, Simek, Kořinková, 2015)

Въглеродният монооксид, наричан още въглероден оксид или въглероден окис, е газ без цвят и мирис, с моларна маса 28 g/mol (по-лек от въздуха). Въглеродният оксид е продукт от непълното изгаряне на съдържащи въглерод вещества при липса на достатъчно кислород, необходим за пълното окисление до въглероден диоксид. При висока концентрация газът е опасен за хората и животните, въпреки че се произвежда в малки количества при нормалния метаболизъм на животните и се смята, че има нормални биологични функции. Няколко случая от български пещери в последните години завършват фатално именно поради инцидентно награвяне на хора с CO.

Сероводородът (H₂S) е характерен за въздуха на пещери, през които протичат минерални води. H₂S често се среща във вулканични пещери заедно с SO₂, CO₂, N₂ и други газове. Отравянето с водороден сулфид настъпва при концентрация 0,2–0,3 mg/l, а над 1,0 g/l при съдържание му е фатално.

В много региони по света във въздуха на пещерите се отбелязва повишено съдържание на радон. Той е безцветен тежък газ, без мирис и вкус, генериран от разпадането на радиоеви изотопи. Източник на радий е уранът, съдържащ се обикновено в ниски концентрации в скалите. Разпадът на радон произвежда радиоактивно алфа- и бета-лъчение. В сравнение с нивата в открита атмосфера алфа-лъчението в пещерите, свързано с радон, е повишено с 1-2 (понякога до 4) порядъка.

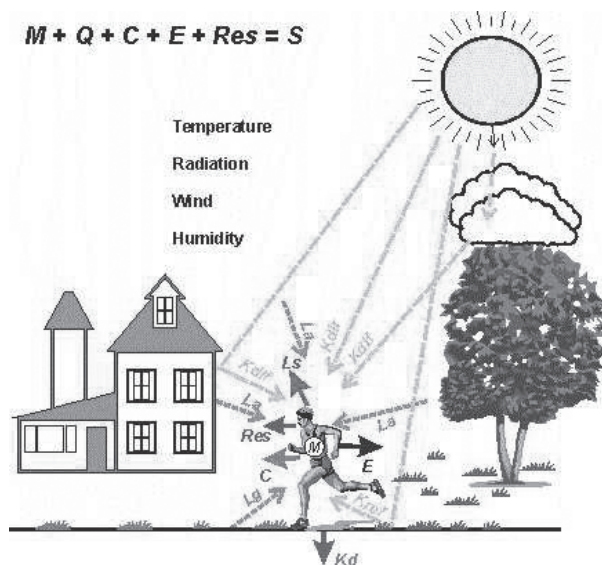
В България съдържанието на радон в пещерите се изследва целенасочено от Експерименталната лаборатория по карстология на НИГГГ – БАН, която е изградила специализирана научна мрежа BGSpeleo-RadNet за мониторинг на радона (<http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/sci-networks.html>, <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/base.html>). Тази мрежа осигурява обективна информация в три научно-приложни области, свързани с наличието на радон в пещерите: роля на естествените радиационни процеси в съвременния карстогенезис (<http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/methodology.html>); връзка между радона и земетръсната активност (Stefanov, Turek, Svetlik, Briestensky, 2017); радиационна защита на работещите в карстовите пещери (Turek, Stefanov, Svetlik, Orcikova, Simek, Kořínková, 2015; <http://prokarstterra.bas.bg/forum2019>). Изследвани са 12 български туристически пещери, при което се установява, че тези, в Северна България, показват повишени концентрации на радон (Rn²²²), сходни с концентрациите в други части на света – между 3–10 kBq.m⁻³ (фиг. 5). Съответното ниво на облъчване на пещерните екскурзоводи, пребиваващи значително по-дълго под земя, в сравнение с туристите, представлява риск за здравето им и този сериозен проблем би следвало да бъде нормативно обезпечен. С по-ниски стойности на радона са пещерите в Родопите (Turek, Stefanov, Orcikova, 2020).

ПЕЩЕРЕН БИОКЛИМАТ

Биоклиматът на пещерите отразява ефектите на специфичния им микроклимат върху компонентите на живата природа, включително върху човека. Биоклиматичният статус на сложния и фин човешки организъм зависи от комплексното въздействие на всички микроклиматични фактори на пещерната среда, сред които водещо място имат тези, обуславящи топлинния комфорт на

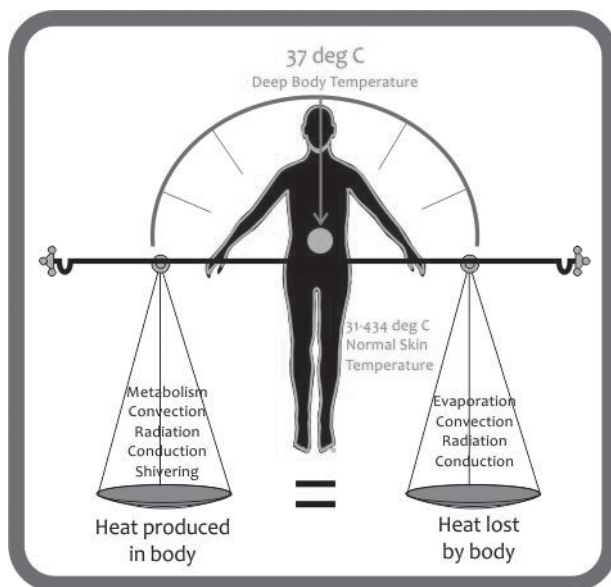
човека. Механизмът на формиране на този комфорт зависи от особеностите на топлообмена между човешкото тяло и околната среда. По принцип топлината в човешкото тяло има два главни източника – вътрешен и външен. Вътрешният източник са процесите на основен метаболизъм, както и производството на топлина при съответно физическо натоварване. Външният източник са късовълновата слънчева радиация, попадащ директно върху човешкото тяло, както и дълговълновото излъчване от повърхностите на обектите от заобикалящата среда (в пещерни условия липсва източникът на късовълнова радиация). Тези енергийни приходи постъпват към човешкото тяло по конвективен, кондуктивен и радиационен път. Същевременно човешкото тяло отдава топлина към заобикалящата го среда по идентични физически пътища (като изключим късовълновата радиация), а също и чрез загуба на топлина за изпарение от повърхността на тялото, както и чрез респирация в процеса на дишане (фиг. 6).

Разликата между приходите и разходите на топлина към и от човешкото тяло формира неговия топлинен баланс. От това, дали балансът е положителен, отрицателен, или близък до/равен на нула, зависи топлинният комфорт на човека. При положителен топлинен баланс приходите на топлина в човешкото тяло надвишават разходите ѝ. В случай че тялото не може да освободи тази топлина, организмът изпитва топлинно натоварване и възниква съответен риск от прегряване, и от последващи неблагоприятни физиологични реакции на ор-



Фиг. 6. Компоненти на топлинния баланс на човека: Слънчева радиация – пряка (K_{dir}), разсеяна (K_{dif}), отразена (K_{ref}); Дълговълнова радиация – земна (L_g), от въздушната среда (L_a), от човешкото тяло (L_s); Топлинни потоци: метаболитен (M), конвективен (C), евапорационен (E), респираторен (Res), кондуктивен (K_d); Топлинен баланс на човешкото тяло (S); Радиационен баланс на човешкото тяло (Q)

(Източник: Blazejczyk, *Bioclimatic principles of health tourism*, Yamanashi Institute of Environmental Sciences, Conference Reports, 2008)



Фиг. 7. Пътища на уравнивяване на топлинните приходи и топлинните загуби в човешкото тяло
(Източник: *Thermal comfort*. <https://nzeb.in/>)

ганизма. При отрицателен топлинен баланс и съответен недостиг на топлина в тялото се наблюдава сходен топлинен риск, но от преохлаждане, а при баланс, равен, или близък до нула, човешкият организъм изпитва топлинен комфорт (фиг. 7).

Топлинният комфорт на човека е функция на две групи от фактори – персоналните параметри на човека (физиология, физическо натоварване и облекло) и параметрите на климатичната среда. Последните включват съчетанието от температурата и влажността на въздуха, скоростта на вятъра, атмосферното налягане и слънчевата радиация. Тези климатични елементи търпят съществена трансформация в пещерни условия, обуславяща т.нар. пещерен биоклимат. При средна температура на въздуха през лятото около $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, каквато е температурата в преходната зона на много от българските пещери, относителна влажност около 90%, скорост на вятъра около $0,7\text{ m/s}$, стандартно лятно облекло ($0,9\text{ clo}$), и физическо натоварване 110 W/m^2 (бавен ход), биоклиматичните параметри в пещерна среда са следните (табл. 1):

Получените стойности показват, че при зададените метеорологични параметри, както и тези, на облеклото и физическата активност, човек би останал в статус на термичен комфорт (неутрално топлинно усещане) в продължение на 261 min. Ако обаче изолационните качества на неговото облекло бъдат повишени до оптималните – в случая $1,1\text{ clo}$, или се повиши физическата му активност до 142 W/m^2 , тогава статусът „топлинен комфорт“ на практика няма да бъде времево лимитиран.

Таблица 1

Стойности на биоклиматичните показатели през лятото

Биоклиматичен показател	Стойност
Субективна температура	19,3 °C
Топлинно усещане	неутрално
Термофизиологично натоварване/стрес	липсва стрес
Продължителност на времето за престой без риск от преохлаждане (при обичайно лятно облекло и физическа активност 110 W/m ²)	261 min
Оптимално облекло (при физическа активност 110 W/m ²)	1,1 clo
Оптимална физическа активност (при стандартно лятно облекло)	142 W/m ²
Риск от дехидратация	липсва риск

При средна температура на въздуха около 10 °C, каквато е температурата през зимата в преходната зона на много от българските пещери, относителна влажност около 80%, скорост на вятъра около 0,7 m/s, стандартно демисезонно облекло (1,5 clo), и физическо натоварване 110 W/m² (бавен ход), биоклиматичните параметри в пещерна среда са следните (табл. 2):

Получените стойности показват, че при зададените метеорологични параметри, както и тези, на облеклото и физическата активност, човек би останал в статус на термичен комфорт (неутрално топлинно усещане) в продължение на 614 min. Ако обаче, изолационните качества на неговото облекло бъдат повишени до оптималните – в случая 1,6 clo, или се повиши физическата му активност

Таблица 2

Стойности на биоклиматичните показатели през зимата

Биоклиматичен показател	Стойност
Субективна температура	14,1 °C
Топлинно усещане	неутрално
Термофизиологично натоварване/стрес	липсва стрес
Продължителност на времето за престой без риск от преохлаждане, (при обичайно демисезонно облекло и физическа активност 110 W/m ²)	614 min
Оптимално облекло (при физическа активност 110 W/m ²)	1,6 clo
Оптимална физическа активност (с обичайно демисезонно облекло)	121 w/m ²
Риск от дехидратация	липсва риск

² Топлинното усещане попада в градация „неутрално“ („комфорт“) в диапазона от 9,1 до 18,0 °C по скалата на съответния индекс за термичен комфорт на човека.

до 121 W/m^2 , тогава продължителността на състоянието „топлинен комфорт“ на практика няма да бъде лимитирана.

Въз основа на тези резултати следва изводът, че при стандартно сезонно облекло биоклиматът на повечето български пещери осигурява топлинен комфорт на човека, за разлика от външните условия, които през лятото обуславят възможности за прегряване, а през зимата – за преохлаждане на човешкия организъм.

Топлинният преход от условията навън, където може да бъде горещо или студено, към условията вътре в пещерата обаче е значителен и обуславя възможност от възникване на рискови за човека натоварвания на термоадаптацията му система. При прехода между условията на открито и тези в пещерата промените са резки (понякога $> 25 \text{ }^\circ\text{C}$) и много бързи. При това туристите най-често влизат в пещерите с неподходящо облекло (особено през лятото). Рисковете са най-големи за пещерните екскурзоводи, които са изложени многократно на резките температурни промени (Turek, Stefanov, Orcikova, 2020).

Наред с това по-продължителен престой в пещерни условия при несъобразено облекло и/или физическа активност може да доведе до топлинен дисбаланс и риск, най-често от преохлаждане. Това се случва, когато сумата от загуби на топлинна енергия е по-голяма от произведената от организма енергия. Тогава в човешкия организъм възниква дефицит на топлина, което предизвиква преход към състояние на дискомфорт. Охлаждането се осъществява преди всичко посредством крайниците (58%) и главата (18%). Топлозагубите от изпарение съставляват 12-27% и се осъществяват чрез кожата и белите дробове (при издишването на въздух). Загубите на топлина се компенсират чрез повишена топлопродукция, която в условията на ниски температури (напр. едночасов престой в пещера с температура $4 \text{ }^\circ\text{C}$) нараства до 4 пъти, а когато е съпътствана от физическа работа – до 7 пъти. Ако общите загуби на топлинна енергия не могат да се компенсират от произведената от организма енергия, започва неговото преохлаждане (Сб. лекции на Българската федерация по спелеология).

БИОКЛИМАТИЧНИ РИСКОВЕ И РЕСУРСИ НА ПЕЩЕРИТЕ

Комплексното съчетание от всички разгледани по-горе климатични параметри оформя един специфичен пещерен микроклимат, притежаващ някои полезни свойства за човека. Този микроклимат се отличава спрямо външния с липсата на силно изразени екстремуми и резки смени, с плавност, постоянство и мекота. Това обезпечава постоянен топлинен статус на тялото, който при подходящо облекло и физическа активност може да бъде поддържан около нулевата стойност. По този начин термоадаптацията система на човешкия организъм е освободена от необходимостта да влиза в често и интензивно действие, разтоварвайки и останалите физиологични функции на организма. Това създава благоприятна база за усвояване и на други въздушни ресурси на пещерите, напр. наситения с микроминерлни частици, отрицателни йони и други микроеlementи, въздух в пещерните пространства. В малки количества дори радонът и въглеродният диоксид стимулират имунната система и я привеждат в състояние на по-добра тренираност и готовност за активиране при необходимост.

Резултатите от различни експедиционни и стационарни налюдения на радона в някои пещери показват, че в повечето случаи неговата концентрация при краткосрочни посещения не е опасна. По този начин постоянството на микроклиматичните условия, липсата на резки топлинни промени, несравнимо по-малкото количество на бактерии, прах, алергени и липсата на шум, както и значителното присъствие на отрицателно заредени йони, представляват ценен ресурс на пещерния биоклимат от здравна и профилактична гледна точка. Във връзка с това, все по-често се дискутира съвсем не новата идея за използване на пещерите за специализирани здравни цели (спелеотерапия), дори за изграждане на пещерни лечебници и пунктове за кратковременен оздравителен престой, особено за третиране на заболявания на дихателната и сърдечно-съдовата система (фиг. 8) (Rashleigh, Smith, Roberts, 2014; Чипев, 2018; Nurov, 2010).

Наред с биоклиматичните ресурси, пещерните пространства крият и биоклиматични опасности, създаващи риск за престоя на човек в тях. Още при прехода от външните климатични условия към тези, в пещерата, човек подлага на натоварване термоадаптацията си система, за да компенсира топлинните различия между двете среди. Тези различия най-често са значителни, тъй като през лятото пещерите са значително по-хладни, а през зимата – по-топли, в сравнение с външната среда. При несъобразено облекло и физическо натоварване по-продължителният престой в пещерата може да създаде условия за невъзможност термоадаптацията система на организма да уравни топлинния баланс на човешкото тяло, обуславяйки натоварване и на други негови органи и системи. Това се улеснява и от много високите нива на влажност, възпрепятстващи процеса на топлообмен с околната среда и съответно топлинно адаптиране.



Фиг. 8. Солните мини – три в едно: добив, лечебници и туристически хит.
Солна мина „Величка“, Краков, Полша

(Източник: <https://www.sanusetalvus.com/index.php/2016-03-17-08-20-42/item/1062-solnite-mini-tri-v-edno-dobiv-lechebnitzi-i-turisticheski-hit>)

При по-продължителен престой в пещерите е необходимо да се има предвид и повишеното присъствие на CO_2 и други газове в състава на пещерния въздух, както и натрупващият се прием на радон. Това се отнася особено за персонала, обслужващ туристическите пещери, както и по-продължително пребиваващите под земята спелеоложки експедиции.

Пещерната среда се обитава от различни видове растителни и животински организми. В своята жизнена дейност те отделят вещества, или биват преносители на вируси и бактерии, които могат да представляват заплаха за здравето на човека.

Трябва да се обръща внимание и на това, че човешкият организъм, като топлинна система, също въздейства върху пещерния микроклимат, чрез температурата и влажността на своето тяло, чрез топлината, отделяна в процеса на респирация, чрез разместването на въздушните пластове при своето движение и т.н. При по-масово посещаваните пещери това може да наруши равновесието на пещерния микроклимат и да застраши жизнената среда на естествено обитаващите я организми и микроорганизми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфичните условия на пещерните пространства създават свой собствен микроклимат. Основните му фактори са климатичната зона, в която е разположена пещерата, нейната надморска височина, вътрешна денивелация, дължина и геометрия, продухваемост и др. Най-важните характеристики на пещерния климат са температурата, влажността и движението на въздуха, и неговият газов състав. Температурата на въздуха има много по-малка денонощна и годишна амплитуда в сравнение с условията на открито. При входовете на пещерата нейните стойности са по-близки до тези на външната температура, но в най-вътрешните пещерни пространства тя остава почти постоянна през цялата година. През лятото в пещерите е по-хладно, а през зимата – по-топло, отколкото извън нея. Пещерната влага е висока. Тя се просмуква през пещерните пукнатини или се формира при кондензация на съдържащата се в атмосферата влага. Движението на въздуха в пещерите по принцип е много по-слабо в сравнение с това на открито. То е по-добре изразено при пещери със значителна вертикална денивелация или такива, с повече от един вход. Газовият състав на пещерния въздух се отличава с липса на прах, алергени и бактерии. В него се наблюдава повишено съдържание на CO_2 , Rn и др., както и на някои микроелементи.

Специфичните климатични условия на пещерите съдържат съществени ресурси, както и опасности по отношение на биокомфорта на човешкия организъм. Той може да бъде повлиян в топлинно отношение, а също и чрез качествата на атмосферния въздух. Топлинният комфорт може да се възползва от постоянството на пещерния биоклимат, но в същото време може да бъде подложен на риск при контрастния преход от условията на открито към тези, вътре в пещерите, както и при по-продължителен престой с несъобразено облекло и физическа активност. Качеството на атмосферния въздух може да повлияе благоприятно върху някои заболявания, чрез присъствието на полезни соли, мине-

рали и газови частици, но при високи концентрации, например на CO₂, Rn и др., може да стане заплаха за човешкия организъм.

За оптимизиране на използването на биоклиматичните ресурси на пещерите и предпазване от техния риск биоклиматичен потенциал предлагаме следните мерки:

- Инсталиране на сензори за автоматичен микробиоклиматичен мониторинг извън и във вътрепещерното пространство на всяка официално обявена за туристически обект пещера в страната;

- Биометеорологично оценяване в оперативен порядък на външните и вътрепещерните микробиоклиматични условия;

- Алармено оповестяване на туристите при преминаване на определени прагови стойности на биоклиматичните контрасти;

- Изготвяне на лист с препоръки за случаите с преминаване на праговите стойности;

- Биоклиматично паспортизиране на пещерните туристически дестинации в страната, вкл. оценка на биоклиматичните рискове и ресурси на пещерите;

- Разработване на стандарти за биоклиматичните параметри на пещерите в страната и за условията на труд, рекреация и туризъм в тях.

ЛИТЕРАТУРА

Дублянский, В.Н., Г.Н. Дублянская. 2004. Часть 1. Общее карстоведение. – В: Карстоведение. Пермь, ПГУ, 307 с./ Dublianskii, V.N., G.N. Dublianskaia. 2004. Part 1. General Karstology. In: Karstology, Perm, PGU, 307 pp. (Ru)

Дублянский, В.Н., А.А. Ломаев. 1980. Карстовые пещеры Украины. Наук. думка, Киев, 179 с./ Dublianskii, V.N., A.A. Lomaev. 1980. Karst caves of Ukraine. Nauk. dumka, Kiev, 179 pp. (Ru).

Кюркчиев, Ст. 2019. Микроклиматична характеристика на пещерата Челевечница в Западните Родопи. – Сп. на БГД, Том 41./ Kiurkchiev, St. 2019. Microclimatic characteristic of Chelevechnitzata cave in West Rhodopi mountain. *Journal of BGS*, Vol. 41. (Bg).

Мавлюдов, Б.Р. 2008. Гляциоспелеология: задачи и возможности. - *Спелеология и карстология*, №1, 60-66. Mavliudov, B.R. 2008. Glaciospeleology: tasks and opportunities. *Speleology and Karstology*, Issue 1, pp. 60-66, (Ru).

Мавлюдов, Б.Р., С.В. Токарев. 2019. Климат пещер. – В: Сб. науч. тр. „Пещеры“. Естественнонауч. ин-т Перм. гос. нац. иссл. ун-та, ГИ УрО РАН, Пермь, Вып. 42., 188 с./ Mavliudov, B.R., S.V. Tokarev. 2019. Climate of Caves. In: Proceedings “The Caves”. Institute of Natural Sciences of the Perm State Research University, INSPSRU, Perm, Issue 42, 188 pp. (Ru).

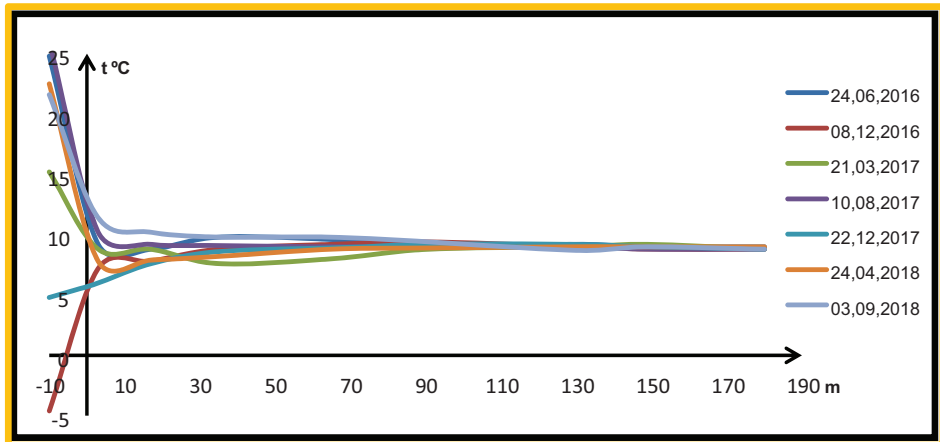
Мавлюдов, Б.Р., Д.А. Усиков. 1979. Предварительный отчет об исследованиях пещеры “Снежная”. Западно-Кавказским карстово-гляциологическим отрядом отдела гляциологии Института географии, Москва./ Mavliudov, B.R., D.A. Usikov. 1979. Preliminary report on the research of the Snezhna cave. West Caucasus Karst-Glaciological Detachment of the Department of Glaciology of the Geographical Institute, Moscow. (Ru).

Чипев, П. 2018. Халотерапия – бягство от мръсия въздух или завръщането на пещерния човек. *Inspiro*, бр. № 1 (44)./ Chipev, N. 2018. Halotherapy – escape from the dirty air or the return of the caveman. *Inspiro*, Issue 1 (44). (Bg).

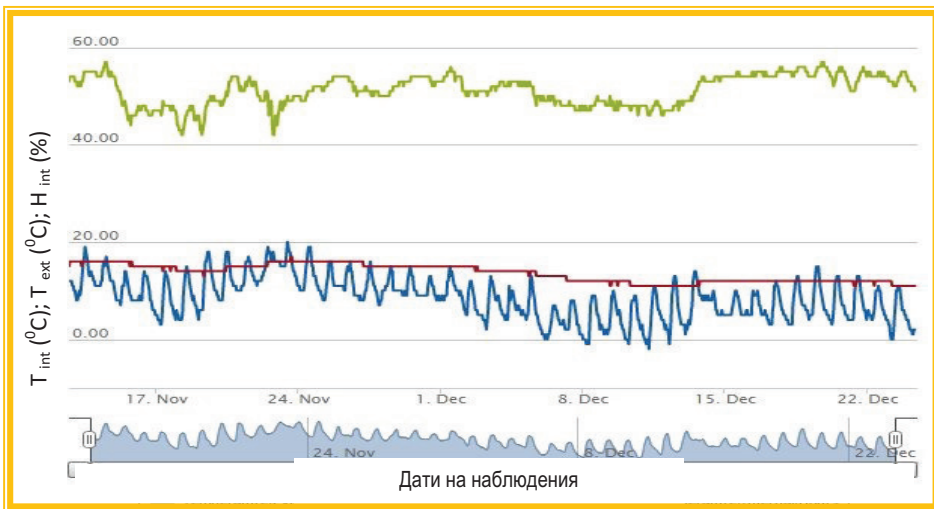
- xxx Пещери в България. <http://caves.free.bg/> ./ Caves in Bulgaria. <http://caves.free.bg/> (Bg)
- xxx Природни забележителности в България. <http://www.pgtlp-popovo.info/materiali/25.pdf/> Natural landmarks in Bulgaria. <http://www.pgtlp-popovo.info/materiali/25.pdf/> (Bg)
- xxx Сборник лекции. Българска Федерация по Спелеология. http://www.nesc.bg/docs/Sbornik_lekcii_po_peshterno_delo.pdf/ ./ Collection of lectures. Bulgarian Federation of Speleology. http://www.nesc.bg/docs/Sbornik_lekcii_po_peshterno_delo.pdf/ (Bg)
- De Freitas, C.R., R. N. Littlejohn.** 1982. Cave climate: Assessment of airflow and ventilation. *Journal of Climatology*, Vol. 2, Issue 4.
- De Freitas, C.R., R. N. Littlejohn.** 1987. Cave climate: Assessment of heat and moisture exchange. *Journal of Climatology*, Volume 7, Issue 6, pp 553-569.
- De Freitas, C.R.** 2010. The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. *Acta Carstologica*, 39/3, 477-489.
- Blazejczyk, Kr.** 2008. Bioclimatic principles of health tourism. Yamanashi Institute of Environmental Sciences, Conference Reports.
- Havenith, G., D. Fiala.** 2016. Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. *Comprehensive Physiology*, 6(1), ISSN: 2040-4603. DOI:10.1002/cphy.c140051, pp.255-302,
- Mammola S., E. Piano, P.M. Giachino, M. Isaia.** 2017. An ecological survey of the invertebrate community at the epigean/hypogean interface. *Subterranean Biology* 24: 27-52, <https://doi.org/10.3897/subtbiol.24.21585>.
- Nurov I.** 2010. Immunologic features of speleotherapy in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Medical and Health Science Journal*, 2:44-47.
- Rashleigh, R., S. Smith, N. Roberts.** A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease. *International Journal of COPD*, 9:239-246.
- Stefanov, P., K. Turek, I. Svetlik, M. Briestensky.** 2017. Radon and fault displacements in Bacho Kiro cave (Bulgaria) related to closely situated earthquakes. In: Proceeding papers of the 5th International Scientific conference „Geographical Sciences and Education“, November 4-5, 2016, Shumen University, University Press, Shumen, pp. 49-56.
- Turek, K., P. Stefanov, I. Svetlik, H. Orcikova, P. Simek, T. Kořínková.** 2015. Radon and CO2 concentration screening in Bulgarian caves. *International Journal of Geoheritage*, Darswin Publishing House, 3(2), pp. 14-23.
- Turek, K., P. Stefanov, H. Orcikova.** 2020. Monitoring of Radon Concentrations in Bulgarian Show Caves (with assessment of radiation risk). *SocioBrains*, Issue 66, ISSN 2367-572.
- Wang, X.S., L.Wan, J.Huang.** 2014. Variable temperature and moisture conditions in Yungang Grottoes, China, and their impacts on ancient sculptures. *Environ Earth Sci*, 72: 3079. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3213-x>.
- xxx Thermal comfort: <https://nzeb.in/>
- xxx <https://www.bedrock.es/caves-retain-a-constant-18c/>.
- xxx <https://www.sanusetsalvus.com/index.php/2016-03-17-08-20-42/item/1062-solnite-mini-tri-v-edno-dobiv-lechebnitzi-i-turisticheski-hit> .
- xxx <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/methodology.html>.
- xxx <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/sci-networks.html>.
- xxx <http://www.prokarstterra.bas.bg/lab/base.html>.
- xxx <http://prokarstterra.bas.bg/forum2019>.



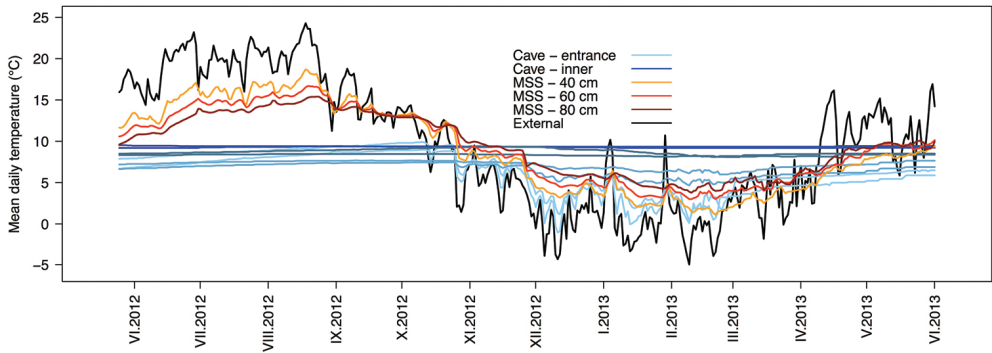
Фиг. 1а. Микроклиматично зонирание на пещера Челевечницата
(Източник: Кюркчиев, 2019)



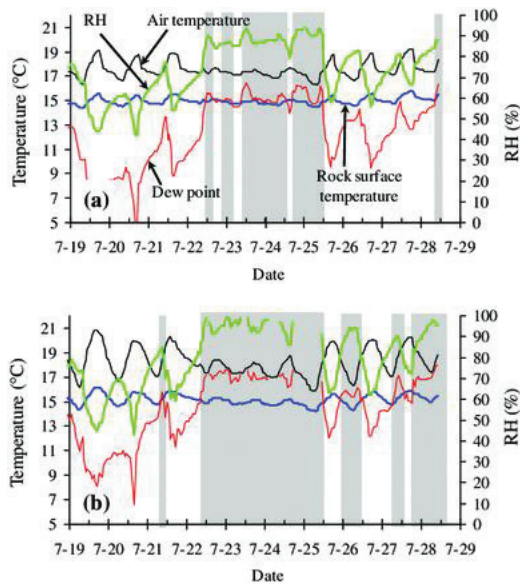
Фиг. 1б. Температурни профили по оста на пещерата Челевечницата (2016–2018 г.)
(Източник: Кюркчиев, 2019)



Фиг. 2. Пещерата Галера/ Андалусия: Почасова температура на въздуха в пещерата (T_{int}) – червена линия; относителна влажност в пещерата (H_{int}) – зелена линия; температура на въздуха извън пещерата (T_{ext}) – синя линия
(Източник: <https://www.bedrock.es/caves-retain-a-constant-18c/>)



Фиг. 3. Годишен ход на температурата на въздуха в пещерния комплекс Пунето
(Източник: *Mammola, Piano, Giachino, Isaia, 2017*)



Фиг. 4. Пещерни галерии Yungang Grottoes, Китай: денонощна динамика на температурата на въздуха (Air temperature), относителната влажност (RH), точката на оросяване (Dew point) и температурата на повърхността на скалата (Rock surface temperature) през юли, 2007 (а-галерия 5, б-галерия 9). В сиво са показани периодите на кондензация (Източник: *Wang, Wan, Huang et al., 2014*)

