

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

**НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА,
ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ**

**Департамент География
Секция “Физическа география”**

Докторант Стоян Станев Кюркчиев

**МИКРОКЛИМАТ И АКТИВНОСТ НА РАДОНА
В МОДЕЛНИ КАРСТОВИ ПЕЩЕРИ В
БЪЛГАРИЯ**

Автореферат

**на дисертационен труд за присъждане на
образователната и научна степен ”доктор”**

**Професионално направление: 4.4. Науки за Земята
(География – Климатология)**

Научен ръководител: Доц. д-р Петър Ножаров

Научен консултант: Петър Стефанов

СОФИЯ, 2021

Съдържание

1. Увод	4
1.1. Актуалност на темата.....	4
1.2. Цел и задачи.....	6
1.3. Обект и предмет на изследване.....	7
2. Български и световен опит	8
2.1. Изследване на пещерния климат.....	8
2.2. Изследвания на радона в пещери.....	10
3. Теоретико–методологични основи на изследването.	11
3.1. Климат и микроклимат на карстовите райони ...	11
3.2. Радиационни аспекти в карстовите пещерни системи	14
3.3. Методология на изследването	18
4. Моделни карстови пещери, обекти на изследването	21
4.1. Добростански пещерен район.....	21
4.2. Пещерски пещерен район	24
5. Спелеоклимат на моделните пещери	26
5.1. Пещера Челевечницата	26
5.2. Пещера Старата.....	27
5.3. Пещера Юбилейна.....	27
5.4. Пещера Снежанка.....	28
5.5. Пещера Топчика.....	30
5.6. Пещера Иванова вода	30

5.7. Влияние на глобалните промени в климата върху спелеоатмосферата на моделните пещери	31
6. Обемна активност на радона в моделните пещери..	34
7. Изводи и Заключение	44
Благодарности.....	50
Приноси.....	51
Научни публикации по докторската теза.....	52

1. Увод

1.1. Актуалност на темата

Карстифицираните скали с различна литология, в които е възможно да се развиват карстови процеси, покриват приблизително 10–15 % от площта на сушата. Около 25 % от населението на Земята живее в карстови райони или в близост до тях. Карстът в България заема около 1/4 от територията на страната.

Карстовите територии притежават уникален феномен – подземни кухни и пещери. Те са относително независими естествени образувания. Карстовите пещери са генетична и неделима част от карстовите територии.

Карстовите геосистеми притежават специфичен локален климат. Климатичните условия в карстовите територии се формират под влияние на физико-географското положение, въздушната циркулация, количеството и разпределението на слънчевата радиация, спецификата на карстовия ландшафт. Структурата, морфологията, въздухообменът на карстовата системата, в комбинация с климата на областта, придават спецификата на спелеоклимата на всяка една карстова система.

Обемната активност на елемента радон в карстовите геосистеми зависи от съдържанието на уран и радий в скали, глини и пещерни седименти, морфологията на системата, геолого-тектонската основа, тектонски събития. Сезонната динамика на обемната активност на радона основно се контролира

от вентилационните режими на карстовите геосистеми. Вентилационните режими от своя страна са в пряка връзка с морфологията и спелеоклимата на конкретната карстова система и външните климатични условия.

Важна част от изучаването на радона в карстови геосистеми е свързано с радиационната защита. Като тежък радиоактивен газ, натрупващ се в слабо вентилирани пространства, той може да представлява реална опасност за здравето на хората, работещи в подземните обекти. От радона и неговите продукти на разпад (RnDP) човек получава приблизително 50% от годишната средна ефективна доза, дължаща се на естествения радиационен фон.

Сложността на въпросите, свързани с изучаването на връзката между микроклимата и обемната активност на радона в карстови геосистеми, налага интердисциплинарен подход при обработката, анализа и интерпретацията на получените данни.

Има няколко основни аспекта при изучаването на микроклимата на карстовите системи и обемната активност на елемента радон в тях:

1. Изследването на взаимовръзката между микроклимата (спелеоклимата) и обемната активност на радон в карстови пещери дава ценна информация за протичащите в тях процеси, тяхната димника, интензивност, сезонност.
2. Радонът спомага за изясняване на взаимовръзката между отделните части на карстовата геосистема, за различните процеси, събития, динамика и промени в системата.

3. Изследването на радон в контекста на нормативната уредба и радиационната защита.

1.2. Цел и задачи

Целта на настоящото изследване е анализ на характеристиките на микроклимата и обемната активност на радон, връзката между тях, и връзката им с външния климат и климатичните промени в моделни пещери в Западните Родопи.

Основните задачи, с които е постигната поставената цел, са:

1. Избор на моделни пещери, представителни за карста в Западните Родопите, в които са проведени изследванията;
2. Определяне методиката на изследването;
3. Организиране и провеждане на режимни полеви измервания и спелео- мониторинг:
 - Локализиране на точки, в които ще се измерват микроклиматичните параметри на спелеоатмосферата в отделните пещери;
 - Определяне на пунктове в моделните пещери за постоянен мониторинг на обемната активност на радона с пасивни детектори;
 - Провеждане на мониторинг в моделните карстови пещери;

- Обработка и анализ на получените данни от проведения мониторинг;
- 4. Проучване на спелеоклиматичните условия и спелеомикроклиматично зонирание в моделните пещери;
- 5. Определяне на обемната активност на радона в моделните пещери. Скринингово определяне на индивидуалните ефективни дози на екскурзоводите в туристическата пещера Снежанка по модел на методиката на Института по ядрена физика на Чешката академия на науките;
- 6. Проучване на връзките между спелеоклимата и вентилационните режими в моделните пещери и годишното разпределение на обемната активност на радон в тях;
- 7. Определяне на тенденциите за изменение на климатичните елементи (температура, валежи и др.) за периода 1979 - 2020 г. в Пещерския и Добростанския пещерни райони и тяхното влияние върху спелеоклимата.

1.3. Обект и предмет на изследване

Обект са 6 пещери в два пещерни района в Западните Родопи (1.3). Три от пещерите се намират в Добростански пещерен район с № 407 (Иванова вода, Топчика и Челевечницата) и три в Пещерски пещерен район с № 406 (Юбилейна, Старата/Новата и Снежанка). Пещерите се развиват в мрамори от Асеновска литоложка единица.

Предмет на настоящото изследване е спелеоклиматът и обемната активност на радон в моделните пещери в Западните Родопи, а също така установяване на взаимовръзки между тях.



Фиг. 1.3. Местоположение на пещерите, обекти на изследването.

2. Български и световен опит

2.1. Изследване на пещерния климат

Микроклиматичните проучвания в пещерните системи до края на XIX в. и началото на XX в. имат предимно наблюдателен характер, без последващо развитие на теоретични модели. В средата на XX век са публикувани редица научни материали относно пещерната атмосфера и микроклимат.

Развитието на технологиите дават чудесна възможност за събиране, архивиране и анализиране на

огромно количество данни от различни пещерни обекти. Създава се и възможност за измерване и запис на различни параметри на пещерната среда в реално време. Това позволява да се търси връзката между стойностите на елементите на спелеоатмосферата и на външната атмосфера, морфологията на дадената пещера, както и да се разработват климатични и вентилационни модели на спелеоатмосферата.

Събирането на сведения за спелеоклимата на българските пещери може да се раздели на няколко етапа.

1. До началото на деветдесетте години на XX век основната част от данни за микроклимата на пещерните системи е получавана по време на провежданите в страната пещерни експедиции, организирани от клубовете по места и Българска федерация по спелеология.
2. През седемдесетте години на XX в. Географския институт на БАН провежда микроклиматични измервания в благоустроените пещери в България и организира непрекъснат инструментален мониторинг с продължителност 2–3 години в пещерата Леденика. От края на 70-те години Ал. Стоев работи по темата спелеоклимат с акцент физическата същност на спелеоклимата.
3. През XXI век спелеоклиматичен мониторинг провежда Експерименталната лаборатория по карстология към Националния институт по геофизика, геодезия и география към БАН.

2.2. Изследвания на радона в пещери

България е една от първите страни в света, в която се измерват нивата на радон в околната среда. В началото на ХХ са проведени измервания на радона в минерални води. За периода 1958–1991 г. са проведени около 5000 измервания на радон, основно в уранови мини. Първото проучване на радиационната обстановка в пещери в България е проведено от екип от Института по радиобиология и радиационна хигиена в София.

От 2011 г. Експерименталната лаборатория по карстология към Национален институт по геофизика, геодезия и география при БАН, съвместно с Департаментът по радиационна дозиметрия на Института по ядрена физика на Чешката академия на науките, Прага, изучава систематично концентрацията на радон в моделни карстови пещери в България.

В научната литература съществуват редица проучвания, свързани с риск за здравето на работещите в карстовите пещери. Радиационната опасност за персонала е възможна вследствие вдишвания радон и продуктите му на разпад по време на работа в пещерата. Такава специфична група работещи са екскурзоводите в туристическите пещери и хората, работещи в привходните пещерни.

3. Теоретико–методологични основи на изследването

3.1. Климат и микроклимат на карстовите райони

Климатът в България се формира под влиянието на атмосферната циркулация, характерна за Югоизточна Европа и Балканския полуостров, географското положение, физико-географските условия, релефът, близостта до Средиземноморския басейн и Черно море.

Климатична подялба на Балканския полуостров, основана на вътрешногодишното разпределение на атмосферното налягане на морското равнище, което определя от своя страна доминиращите въздушните маси и атмосферната циркулация над района, е предложена от Nojarov (2017).

Микроклиматът на дадената карстова територия се обуславя от взаимодействието на две взаимно свързани климатични подсистеми:

- *климат* на дадената карстова територия и *микроклимат* на отделни нейни части (въртоп, сляпа долина, карни полета, ждрела, каньони и др.);
- *спелеоклимат* (пещерен климат) и *спелеомикроклимат* на отделни част от дадена пещерна система (зали, галерии, отвеси и шахти).

Климатът на карстовите територии се формира под влияние на климатичните условия, физико–географските условия, наличието на пещерни

системи. Карстовият релеф оказва силно влияние при формирането на климата на карстовата територия, микроклиматът на отделни негови части и разпределението на климатичните елементи.

Спелеоатмосферата съществено се различава от атмосферата на повърхността. Това се дължи на протичащите в пещерната система процеси и морфоложките им особености. Газовият състав на спелеоатмосферата е специфичен – с повишено съдържание на радон, въглероден диоксид, азот, сероводород и други газове компоненти с ниска концентрация на аерозоли и микроорганизми.

От спелеоклиматична гледна точка пещерните системи, в зависимост от това дали се осъществява пряк контакт между спелеоатмосферата и външната атмосфера, се разделят на:

- отворени към външната атмосфера;
- изолирани пещерни система;

Във всяка една от двете пещерни системи е възможно да има изолирани нейни части. Изолираността се определя от морфологията на пещерната система.

Спелеоклиматът на пещерните системи се формира под влиянието на: морфоложките им особености, определящи характерната въздушна циркулация в нея; климатът на местността, където се развива пещерната система; надморската височина на местността; степента на напуканост на карстовия масив; експозицията на входа (входовете); характерът

и циркуляционните режими на водите в дадения масив; геотермалното състояние на карстовия масив.

Спелеоклиматичните условия притежават свой неповторим облик за всяка една карстова пещерна система. На този етап няма обобщен модел на спелеоклимата, но са налице някои закономерности в разпределението, динамиката и сезонността на спелеоклиматичните параметри: сравнително постоянни температури, висока относителна влажност на въздуха, сезонна смяна на въздушната циркулация, липса на слънчева светлина.

Вентилационните режими са неповторими и индивидуални за всяка една карстова пещерна система. Това се дължи на уникалните за всяка една от тях морфология, структура, размери, денивелация, температурни режими, количество и годишно разпределение на проникващите повърхностни води, разположение, големина и относителна височина на пещерните входове, средногодишни външни температури и тяхната амплитуда

Водещите фактори, определящи вентилационните режими в карстовите пещерни системи са:

- Разликата в плътността на въздуха в пещерата и извън нея, предизвикана от разликата в температурите им;
- Разлика в барометричното налягане в пещерата и извън нея;

Като основен фактор, определящ посоката и интензивността на вентилацията в дадената пещерна система, може да се посочи разликата в плътността на

въздуха в пещерата и извън нея, предизвикана от разликата в температурата.

През студеното полугодие се създават условия за интензивни вентилационни процеси в пещерните системи. През топлото полугодие вентилационни процеси в пещерните системи са с ниска интензивност.

На база дългогодишни изследвания на спелеоклиматичните условия в пещерните системи е установено, че в тях могат да се разграничат няколко спелеоклиматични зони. Според повечето автори те са 3 (привходна, преходна и зона на постоянни температури). Пространствените размери на зоните се определят от спецификите на всяка една пещерна система – морфология, размери, форми, обем, ориентация, вентилация, физико–географски и климатични условия.

3.2. Радиационни аспекти в карстовите пещерни системи

Радиационната обстановка в карстовите пещерни системи притежава своя специфика. Това се дължи на особеностите на карстовите пещерни системи като природни образувания, тяхната морфология, геоложко и хидроложко-геоложко развитие, като следва.

- Натрупване и задържане на радон в пещерните системи;
- Характерни вентилационни режими на пещерните системи или на отделни техни части;

- Ориентация, размери и степен на напуканост на скалите и коефициента на ексхалация на радон от скали и глини;
- Климатични условия;
- Специфична концентрация на радон, вследствие на тектонски движения;
- Сравнително ниското съдържание на уран и торий в карбонатните скали и значително по-високото им съдържание в пещерните глини;
- По-ниския γ -фон, дължащ се на намаляване влиянието на космическата компонента при формиране на естествения γ -фон в дълбочина на карстовия масив;
- Възможно увеличаване на γ -фона при алогенен тип карст, привнасяне на материали (скали и минерали обикновено с вулкански произход) с по-високо съдържание на радиоактивни изотопи;
- Наличие на минерални води с висока радиоактивност

Радонът е естествено повсеместно разпространен радиоактивен благороден газ, без мирис и цвят. Определя се като най-тежък в сравнение с другите благородни газове. Член е на уран-радиевото семейство.

Няма стабилни и дългоживущи изотопи. Естествено срещани в природата са три от изотопите на радона, а именно ^{219}Rn (актинон, An) от серията на разпад на актиний (^{235}U), ^{220}Rn (торон, Tn) от серията на разпад на торий (^{232}Th), ^{222}Rn (радон, Rn) от серията на разпад на уран (^{238}U). Изотопът с най-голям период на полуразпад $T_{1/2} = 3,8229 \text{ d}$ е радон (^{222}Rn), който има

съществен принос за радиационното облъчване на човека. От гледна точка на радиационната защита, основна роля като източник на облъчване имат неговите краткоживеещи продукти (RnDP): полоний (^{218}Po), олово (^{214}Pb), бисмут (^{214}Bi), полоний (^{214}Po).

Средната концентрация на радона във въздуха е $\sim 10-100$ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).

Относително дългият период на полуразпад на радона и голямата му подвижност позволяват на радона да мигрира на големи разстояния от мястото си на образуване, придвижвайки се по канали, пори и пукнатини в почвата и скалите. Миграцията на радона силно зависи от атмосферните и хидроложките условия, структурата и плътността на скалите, наличието, ориентацията и размерите на пукнатини и пори в скалите, степента на вентилация в свободните обеми в скали и почви.

Типично за карстовите пещери през топлото полугодие е, че концентрацията на радон е по-висока спрямо студеното полугодие. Лятната и зимната динамика на радоновата концентрация се обяснява със сезонната динамика на пещерната атмосфера.

Сложната и многофакторната динамика на радона изискват интердисциплинарен подход при разработване на модели за разпределение на концентрацията му в карстовите системи.

От гледна точка на радиационната защита, радонът е основен по важност радиологичен фактор. Той определя приблизително 50 % от средно годишната ефективна доза на дадена популация, дължаща се на естествения радиационен. Радонът (Rn)

и неговите краткоживущи продукти на разпад (RnPD) са вторите по важност фактори, след тютюнопушенето, влияещи за заболяване от рак на белия дроб.

В много страните по света са разработени и проведени целенасочени програми за детайлно изследване на радона. На базата на тези данни, СЗО направи оценка, че в различните страни между 3 % и 14 % от случаите на белодробен рак се дължат на облъчване от радон

В Директива на Европейският съвет 2013/59/ЕВРАТОМ от декември 2013 г. за определяне на основни норми на безопасност за защита срещу опасностите, произтичащи от излагане на йонизиращо лъчение, специално внимание се обръща на облъчването на радон.

Наредбата за радиационна защита (2020) определя изискванията за защита на здравето и нормите на облъчване, дължащи се на естествени и техногенни радиоактивни източници като са посочени референтни нива (гранични стойности). В Глава шеста, Радиационна защита при професионална облъчване, раздел II, Организация на работните места, е определено референтното ниво за радон.

Поради спецификата на пещерата като работно място, единственият възможен начин за недопускане на опасно високи стойности на ефективната доза доза от инхалиране на радон е чрез намаляване на работното време, по - точно на престоя в пещерна среда.

Съществуват две основни групи методи за измерването на радон - активни и пасивни.

В настоящото изследване са използвани проникващи дифузни камери, предоставяни от Департамента по радиационна защита на Чешката АН партньор на Експерименталната лаборатория по карстология в НИГГГ-БАН. Там се обработват и експонираните в българските пещери детектори

Средната обемна активност $A_{V,exp}$ за даден период от време t , ρ е плътността на трековете - формула (3.2).

$$A_{V,exp} = \frac{\rho}{R \cdot t_{exp}} \quad (3.2)$$

С определянето на обемната активност на радона и ефективната доза на персонала, работещ в дадения обект, се дава възможност за оценка на евентуалната радиационна опасност.

Отворените за посещение пещери са признати за „радоноопасни“ или работно място с повишена радиационна опасност за персонала, който работи там - екскурзоводи, пещерни водачи, продавачи на билети, работещи в магазини в пещери или привходни пещерни пространства. Туристическата пещера е специфичен случай на работно място, със специфични условия на околната среда, които биха довели до високи стойности на концентрацията на радон.

3.3 Методология на изследването

В настоящето изследване са избрани пещерни системи с различни морфология, надморска височина,

изложение, размери, растителна и почвена покривка над тях, с различни температурни и вентилационни режими. От голямо значение при избора на подходящи пещери за изследване, е осигуряването на лесен и безопасен целогодишен достъп до обекта на изследване. Част от пещерите се намират в труднодостъпни и отдалечени местности, изискващи много добра планинарска/спелеоложка подготовка и екипировка, особено при проникване и изследване на пропастните пещери.

Изследването на спелеоклимата в моделните пещерите, обект на настоящото изследване, се провежда от 2016 г. на принципа на експедиционен мониторинг.

Температурата и относителната влажност на въздуха се измерват с аспирационен психрометър на Асман с точност $0,2^{\circ}\text{C}$, а със сух живачен термометър с точност $0,2^{\circ}\text{C}$, се измерват и температурите на наличните пещерни седименти и води.

По протежение на профила на всяка една от пещерите са организирани пунктове за измерване елементите на спелеоатмосферата.

От края на 2014 г. поетапно, във всяка една от пещерите, се определя обемната активност (концентрация) на радона. За целта се използват дифузни камери на DRD NPhI – AS CR. Детекторите са пластмасови дискове с диаметър 16 mm и дебелина 0,5-0,7 mm. Камерите с детекторите се калибрират в National Institute for Nuclear, Chemical and Biological Protection (Kamenná near Příbram, Чешка република). Експонираните детектори се обработват в DRD NPhI –

AS CR, където се извършват и изчисленията на концентрациите на радона и ефективните дози. За целта се използва формулата (3.3).

$$E_a = j \frac{\int_{1 \text{ Jan}}^{31 \text{ Dec}} A_V(t) \cdot dt}{2.10^6 \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hour}} \cdot 6 \text{mSv} \quad (3.3)$$

където $A_V(t)$ е сезонната концентрация на радон за периода t в $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Общият брой на организирани полски експедиции в моделните пещери в Западните Родопи е 84 (към 01.07.2021 г):

- Пещера Снежанка – 24 (от тях 17 включват и мониторинг на радона);
- Пещера Иванова вода – 11 (11 за радона, 10 включват спелеоклиматични измервания);
- Пещера Топчика – 10 (8 за радона);
- Пещера Старата – 13 (9 за радона);
- Пещера Юбилейна – 14;
- Пещера Челевечницата – 14 (14 за радона, 13 включват спелеоклиматични измервания);

За проследяване зависимостта на обемната активност на радона в моделните пещери от климатични елементи на външната атмосфера е приложен корелационен анализ, в частност непараметричен анализ на Спирман. Коефициентът на рангова корелация на Спирман е използван за установяване на връзките между различни климатични елементи и обемната активност на радон в моделните пещери.

За оценка промените в климата на двата карстови района е използван регресионен анализ. Той дава отговор на въпроса какъв е характерът на зависимостта между две случайни променливи величини

Изследваните климатични елементи са: температура на въздуха, валежи, изпарение, температура на повърхността, дебелина на снежна покривка, температура и водно съдържание в почвата на дълбочина съответно: 1 ниво – 0-7cm, 2 ниво – 7-28 cm, ниво 3 – 28-100 cm.

На база годишното разпределение на обемната активност на радона в моделните пещери, годината условно е разделена на два периода: период с ниски нива на радон, през студеното полугодие и период с високи нива на радон, през топлото полугодие.

4. Моделни карстови пещери, обекти на изследването

4.1. Добростански пещерен район

Добростанският пещерен район има номер 407 и е част от Рило-Родопската област. Той е изграден от добростански мрамори (As/c) от Асеновската литотектонска единица Мраморите са масивни, среднозърнести, често „захаровидни“, бели до сиви на цвят. Размерът на зърната в мраморите варира от 0,2 до 1,5 mm. Мраморите имат малък наклон. Ритмичното издигане на Западните Родопи, обуславят дълбокото вкопаване на долинната мрежа. Вследствие

на тези издигания, карстовите пещери в района, се етажно разположени.

Платото на Добростански рид представлява карстово поле, в което са образувани плиткы кари, въртопи и понори с неголеми размери, както и подземни карстови форми.

В Добростанския пещерен район са изследвани, проучени и картирани над 400 пещери. Той попада на границата между преходно субтропичен към умерен, преходно океанско-континентален климат на север и преходно континентално-океански, субтропичен климат на юг. Климатът е типично планински, с вертикална етажност на климатичните елементи.

Въз основа на обработените данни от The European Center for Medium–Range Weather Forecasts (<https://www.ecmwf.int/>) за периода 1979 – 2020 г., средно годишната температура за района на Добростански рид е 8,9 °С, а средно годишната сума на валежите са 980 mm. Те имат максимум през пролетта и минимум през есента.

4.1.1. Пещера Топчика

Разположена е в землището на село Добростан, обл. Пловдив се развива в мрамори (As/c) от Асеновската литотектонска единица. Има надморска височина от 982 m и на 297 m над местния ерозионен базис. Общата ѝ дължина е 727 m, а денивелацията ѝ е – 61.

Пещерата е пропадна, двуетажна, суха. Галерията на първия етаж по оста има дължина от 160 m и височина 10–12 m

Горният и долният етаж се свързват с 45 m наклонен отвес, разположен във втората половина на първия етаж. Вторият, по-ниско разположен етаж, има дължина по оста си 350 m.

4.1.2. Пещера Иванова Вода

Намира се в най-западната част на платото на Доброостанския рид, в землището на село Доброостан, обл. Пловдив. Входът на пещерата е разположен в най-ниската част на голям вътроп, с размери около 300 m, на надморска височина 1337 m. Общата дължина на пещерата е 695 m при денивелация от –113 m. Пещерната система се развива в мрамори (As/c) от Асеновската литотектонска единица. Пещерата е пропадна, диаклазна, с течаща вода на дъното и голямо езеро в средната част на пещерата и редица малки синтрови езера, сезонно запълнени с вода. Няма значими странични галерии. Пещерата Иванова Вода е една от най-студените пещери в района и може да бъде причислена към пещерите-ледници, въпреки че образуваният лед рядко се задържа целогодишно

Пещерата не е благоустроена и не е туристически обект. Достъпът до нея е свободен, но може да се посещава само за подготвени спелеолози.

4.1.3. Пещера Челевечницата

Входът на пещерата в землището на село Орехово, обл. Смолян. Той представлява малък отвор в планинския склон на 1130 m н.в.. Челевечницата е формирана по локални разломи в мрамори (As/c) от Асеновската литотектонска единица. Пещерата е низходяща, суха, но с интензивна инфилтрация на валежни води през пролетния сезон. Дължината на пещерата по основната ос е 185 m, а сумарната дължина на всички проучени части е 305 m при денивелация от -12 m.

Пещерата не е благоустроен туристически обект, но е популярна и посещавана. Достъпът до нея е свободен. До входа на пещерата води туристическа маркировка от с. Орехово.

4.2. Пещерски пещерен район

Той е част от Рило-Родопската област по спелеоложкото райониране на Попов (1976) и попада в Баташко-Дъбрашката подобласт на Западните Родопи.

Карстът е развит в Добростански мрамори (As/c) от Асеновската литотектонска единица, мрамори. Те са масивни или ивичести, дребнозърнести, често „захаровидни“, бели до сиво-бели на цвят. Съдържанието на калциев карбонат в тях е 94,54 %. Пещерите са стъпаловидно разположение на карстовите пещери в района.

Пещерският карстов район попада на границата между преходен субтропичен към умерен, преходен

океанско-континентален климат на север и преходен континентално-океански, субтропичен климат на юг.

Въз основа на обработените данни от The European Center for Medium-Range Weather Forecasts (<https://www.ecmwf.int/>) за периода 1979–2020 г., средно годишната температура за Пещерски пещерен район е 10,8 °С, като за северната равнинна част тя е 11,9 °С, а за южната планинска част е 9,7 °С. Средната годишна сума на валежите е 758,4 mm, като за северната равнинна част тя е 609,3 mm, а за южната планинска част е 907,5 mm.

4.2.1. Пещера Снежанка

Входът на пещерата е на 5 km южно от град Пещера. Пещерният вход е на 880 m н.в. и на 300 m над руслото на Новомахленска река, ориентиран на север-североизток и е затворен с метална врата.

Пещерата е суха, низходяща, с дълбочина –18 m. По главната ос тя е дълга, 145 m, а общата дължина е 348 m.. Пещерата представлява поредица от неголеми зали, свързани с обширни коридори.

4.2.2. Пещера Юбилейна

Тя е разположена в северната част на Баташкия рид. Входът е разположен на 25 m над нивото на реката с южно изложение, на 580 m. н.в.. Пещерата е двуетажна, с паралелна етажност, разклонена, с постоянно течаща река на по-ниско разположения етаж. Общата дължина на проучените части е 814 m с денивелация от –18m.

4.2.3. Пещера Старата/Новата

Пещерните входи отстоят на 400 m от главния път Пещера-Батак, нагоре, срещу течението на Новомахленската река, в основата на скален венеч в десния склон на реката на височина от 52 m от нейното коритото. Пещерата е хоризонтална, разклонена, лабиринтна, с дължина 955 m и денивелация +7 m.

5. Спелеоклимат на моделните пещери

5.1. Пещера Челевечницата

Средногодишната температура е 8,97 °С. Относителната влажност във вътрешната част е 97,7 %.



Фиг. 5.6. Микроклиматично зонироване на пещерата Челевечницата.

Пещерата има класическо разпределение на спелеоклиматичните зони – привходна, преходна и вътрешна зона с постоянни температури. Границите на микроклиматичните зони в пещерата са в пряка връзка с морфоложките особености на подземната кухина, които от своя страна влияят на вентилационните процеси в пещерата (Фиг. 5.6).

5.2. Пещера Старата

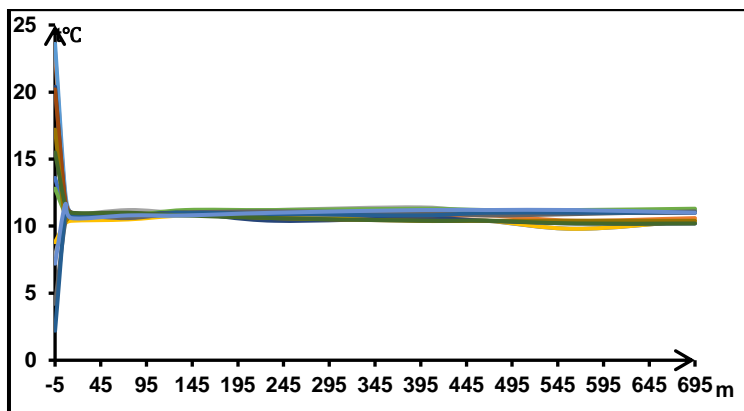
Средногодишната температура на по-ниско разположения първи етаж е 8.9 °С, а на по-високо разположения, втори етаж, е 11,51 °С.

Спелеоатмосферата на първия етаж като цяло е по-динамична от тази на втория етаж. Средногодишната относителна влажност на въздуха на първия етаж е 97,11 %, а на втория етаж е 93,33 %.

В пещерата са формирани три микроклиматични зони и една подзона. При събирането на галерията на първия етаж, с по-високо разположената основна галерия на пещерата, се създава една подзона на вътрешната спелеоклиматична зона. На първия етаж, температурата на въздуха е осезаемо по-ниска от тази на втория етаж.

5.3. Пещера Юбилейна

Средногодишната температура в пещерата е 10,86 °С, като в близост до реката, е по-ниска в сравнение с останалата част на пещерата и достига стойност 10,44 °С (Фиг.5.17). Средногодишната влажност по профила на пещерата е 96,86 %.



Фиг. 5.17. Температурни профили в пещера Юбилейна (2016–2021 г.).

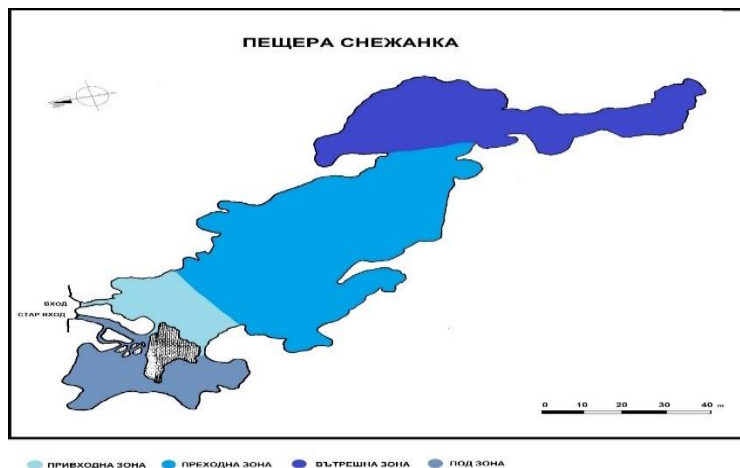
На база анализ на измерените температури на въздуха в пещерата, са локализирани три спелеомикроклиматични зони – привходна зона, преходна зона и зона с постоянни температури. Оформя се една локална подзона в близост до протичащата през пещерата река.

Привходната и преходната спелеоклиматични зони се сливат в една обща зона със сравнително малка дължина. На база измерените температури в тази част на пещерата, може да се разграничи една допълнителна спелеоклиматична подзона, намираща се под влиянието на протичащата тук подземна река.

5.4. Пещера Снежанка

Средногодишната температура по първия профил (от новия туристически вход към дъното на пещерата) е 9,64 °C. Средногодишната температура по втория

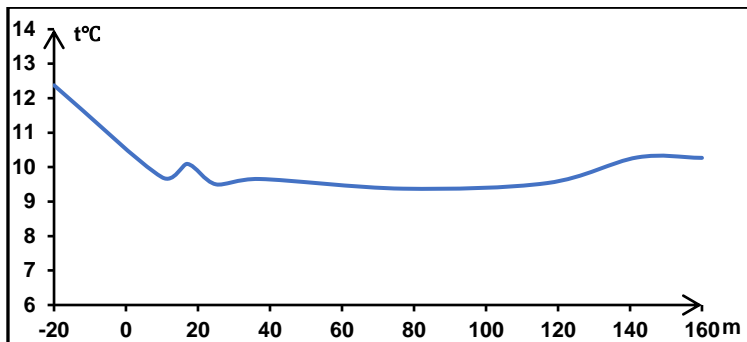
профил (от затворения естествен вход към дъното на пещерата) е $10,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относителната влажност е 95-96 %.



Фиг. 5.27. Спелеоклиматични зони в пещера Снежанка.

Температурите в залата с „Корените“, под стария вход са сравними с температурите в зала ”Срутището“ като средната разлика е $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Това е в пряка връзка не с разстоянието до входа, а с относителната височина спрямо него. Така в пещерата може да се каже, че е налице вътрешнопещерна инверсия по този профил.

Локализирани три спелеомикроклиматични зони в пещерата – привходна зона, преходна зона и зона с постоянни температури. Отделена е и една подзона, разположена под естествения затворен вход на пещерата продрлтувана от морфологията на пещерата (Фиг. 5.27).



Фиг. 5.23. Средногодишна температура по втория профил в пещерата Снежанка (2016-2021).

5.5. Пещера Топчика

Средногодишната температура по профила на първия етаж е 11,07 °C, а средната относителна влажност на въздуха на първия етаж в пещерата е 87,5 %. Средногодишната температура на втория, по-ниско разположен пещерен етаж е 11,26 °C, а средната относителна влажност на въздуха 96,77 % .

В пещерата са локализирани три спелеоклиматични зони – привходна зона, преходна зона и зона с относително постоянни температури.

Целият втори етаж попада в зоната на постоянна температура. Средногодишната температура в тази зона на пещерата Топчика (11,26 °C) е близка до тези в пещера Старата (11,52 °C) и пещера Юбилейна (10,54 °C), въпреки че тези две пещери са разположени на приблизителна 500 m н.в. по-ниско.

5.6. Пещера Иванова вода

Средногодишната температура по профила на пещерата е 5,0 °С. Ниските температури в пещерата се дължат както на нейната морфология, така и на разположението на пещерния вход в голям и дълбок въртоп. Поради това през студеното полугодие в Иванова вода се наблюдава активна вентилация. Температурата в пещерата бавно се повишава от входа към вътрешността, където достига 6-7 °С. Относителната влажност на въздуха по дължина на целия профил има средна стойност 94,57 %.

В пещерата са разграничени три спелеомикриклиматични зони – привходна зона, преходна зона и вътрешна зона. Преходната зона достига дълбоко в пещерата вследствие интензивната вентилация през студеното полугодие. Стичането на студен въздух от околните склонове, предразполага образуването сезонен лед в привходните части на пещерата, достигащ до началото на вертикалните и части.

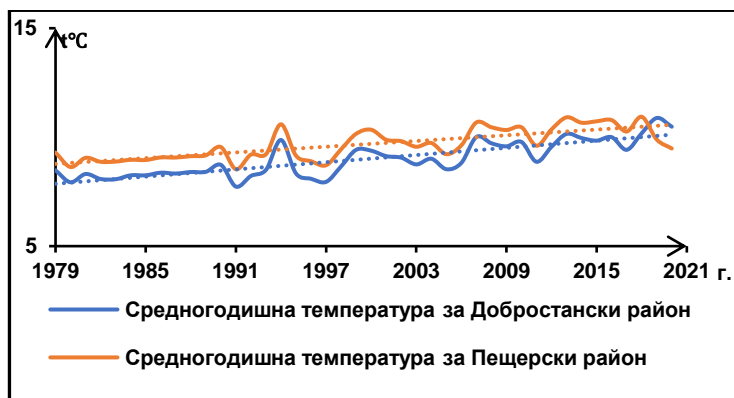
5.7. Влияние на глобалните промени в климата върху спелеоатмосферата на моделните пещери

Климатът на района, в които се развива дадена пещера, се променят бавно с времето. Тези промени дават своето отражение върху термодинамичното състояние на пещерната атмосфера.

За целите на настоящото изследване са анализирани средногодишните температури за двата пещерни района в Западните Родопи, в които са развити моделните пещерни системи. Изследван е

период от 42 години (1979-2020 г.). За базова е използвана наличната информация от The European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), ERA5 reanalysis (Copernicus Climate Change Service).

За Пещерския пещерен район статистическият анализ, при нормално разпределение, установява значимо покачване на средногодишната температура с $0,048 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ или $1,96 \text{ }^\circ\text{C}$ за целия период (Фиг.8.1). Осреднената средногодишна температура за целия период е $9,7 \text{ }^\circ\text{C}$.



Фиг. 5.42. Изменение на средногодишната температура в моделните пещерни райони в Западните Родопи за периода 1979-2020 г.

За Добростанския пещерен район е установено покачване на средногодишната температура с $0,050 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ или $2,05 \text{ }^\circ\text{C}$ за целия период (Фиг. 8.1). Осреднената средногодишна температура за целия период е $8,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

При изпарението е установен значителен статистически тренд и за двата моделни пещерни

района. Повишеното изпарение е свързано с общата тенденция на повишаване на средногодишната температура както в Западните Родопи, така и в България и в света като цяло.

При снежната покривка е установен значим статистически тренд и за двата моделни пещерни района. Снежната покривка намалява значително през последните четиридесет години. Това е свързано с общото повишаване на средногодишната температура.

За моделните пещери в настоящото изследване са открити твърде малко надеждни архивни данни от измервания на температури на пещерния въздух: за вътрешната зона на пещерата Челевечницата 8,1 °С, измерена през май 1978 г.; за пещерата Топчика 11,2 °С, измерена през юни 1975 г.; за пещерата Снежанка 9,5 °С, измерена през април 1964 г.

Анализът показва 99,75% вероятност за значителна разлика на температурата във вътрешната зона при пещера Челевечницата и Снежанка. В Челевечницата тази разлика е по-ясно изразена. Стойността на измерената в миналото температура се различава с 8σ спрямо средната от измерванията за периода 2016-2020 г. При Снежанка разликата е в по-слабо изразено само 3σ спрямо средната за периода 2016-2020 г. В тази пещера е нарушена естествената атмосферна циркулация, с отварянето на пещерата като туристически обект за масово посещение.

И Челевечницата, и Снежанка се развиват на сравнително малка дълбочина. Малката дебелина на скалния пещерен свод е предпоставка климатичните

промени на повърхността сравнително бързо да дават отражение и върху пещерните системи.

При пещера Топчика не е установена промяна на температурните режими на спелеоатмосферата. Тя се развива на значително по-голяма дълбочина. Отвесът, свързващ двата етажа е 61m. Скалният пещерен свод също има значителна дебелина. Тези обстоятелства са причина, на този етап от изследванията, да не е установена измерима, с наличната апаратура, спелеоклиматична промяна, вследствие външните климатични промени.

6. Обемна активност на радона в моделните пещери

Максималната измерена концентрация на радон в пещера Челевечницата пещерата е 4496 Bq.m^{-3} . Средната концентрация на радон за целия период на измерване е 2821 Bq.m^{-3} . В Челевечницата са отчетени най-високите нива на радон в изследваните моделни пещери в Западните Родопи.

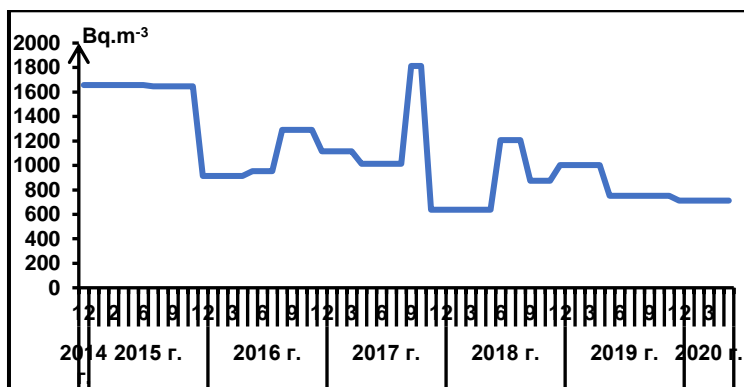
Анализът на годишното разпределение на обемната активност на радона показва слабо изразен цикличен годишен ход. През цялата година обемната активност е сравнително висока, което е възможно да се дължи на:

- целогодишно слабите вентилационни процеси, предизвикани от спецификата на пещерната морфология;

- наличие на пещерни седименти, привнесени отвън (алогенен тип карст);

Максималната измерена концентрация на радон в пещера Старата е 1426 Bq.m^{-3} , а минималната е 331 Bq.m^{-3} . Средната стойност за целия период е 735 Bq.m^{-3} . Обемната активност на радона показва ясно изразена годишна цикличност.

В пещера Юбилейна максималната измерена концентрация на радон е 1813 Bq.m^{-3} , а минималната стойност от 638 Bq.m^{-3} . Средната концентрация на радон за целия период е 1073 Bq.m^{-3} . Характерното годишното рапределение на обемната активност на радона е възможно да се дължи на протичащата през пещерата река или наличието на алогенни пещерни седименти.



Фиг. 6.3. Обемна активност на радон в пещерата Юбилейна (2014–2020 г.).

Дифузни камери за радон в пещера Снежанка са разположени в два пункта: Голямата зала и Вълшебната зала. В настоящото изследване е обхванат периода след 10.07.2016 г.

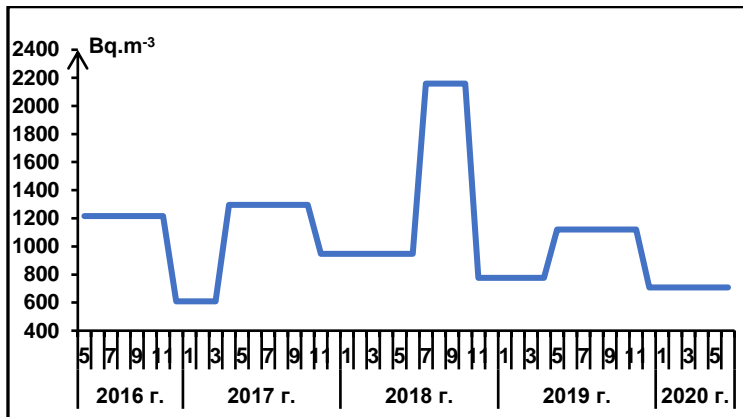
Максималната измерена концентрация на радон в Голямата зала е 1484 Bq.m^{-3} , а минималната е 437 Bq.m^{-3} . Във Вълшебна зала максималната измерена концентрация е 2456 Bq.m^{-3} , а минималната е 574 Bq.m^{-3} . Анализът на данните за обемната активност на радона показват много добра сезонна синхронност между двата дозиметъра в пещерата.

Престоят на посетителите в пещерата е кратък - до 30 min, поради което те не са изложени на радиационна опасност от облъчване от радон. На базата на измерваните при спелеомониторинга стойности на обемната активност на радона е изчислена индивидуална ефективна доза на екскурзоводите: съответно $0,46 \text{ mSv}$ в Голямата зала и $0,42 \text{ mSv}$ във Вълшебната. Сумарно за цялата пещера получаваната ефективна доза от екскурзоводите е между $0,9 - 1,7 \text{ mSv}$. Тези стойности за значително по-ниски от лична референтна доза от 6 mSv за 1 година и при 2000 работни часа.

За периода на изследването в пещера Топчикика максималната отчетена концентрация е 2159 Bq.m^{-3} а минималната концентрация е 609 Bq.m^{-3} . Средната концентрация на радона в пещерата за целия период на изследване е 1245 Bq.m^{-3} .

В пещера Иванова Вода е определена максималната отчетена концентрация на радона е 680 Bq.m^{-3} , а минималната 129 Bq.m^{-3} . Средната концентрация на радона в пещерата е 348 Bq.m^{-3} . Обемната активност на радона в пещерата има ясно изразен сезонен режим. Поради много интензивните

вентилационни процеси в пещерата са отчетени най-ниските нива на радон в сравнение с останалите моделни пещери.



Фиг. 6.5. Обемна активност на радона в пещерата Топчика (2016–2020 г.).

За основна база данни на параметрите на външната атмосфера е използвана наличната информация от The European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 reanalysis (Copernicus Climate Change Service). Работната база данни обхваща периода 2014–2020 г.

Изследваните климатични елементи са: температура на въздуха, валежи, изпарение, температура на повърхността, дебелина на снежна покривка, температура и водно съдържание в почвата различна.

В първа група попадат Иванова вода, Снежанка, Топчика, Старата и Челевещницата. Обемната активност на радона в тази група пещери е в права корелационна връзка с температурните режими на

въздуха в района на моделните пещерите, които контролират и вентилационните процеси в пещерите.

Температурата на спелеоатмосферата е относително по-висока спрямо външната през студеното полугодие, и по-ниска през топлото полугодие. При повишаване на външната температура на въздуха вентилационните процеси в пещерите снижават своята интензивност. По-студеният и плътен пещерен въздух не може да напусне пещерата през входа или пукнатини и се задържа за дълго в нея. Радонът постепенно се натрупва и концентрацията му нараства. През студеното полугодие конвективните процеси се активизират при спадане на външните температури с няколко градуса под температурата на спелеоатмосферата, като интензивността им се контролира от градиента на температурата.

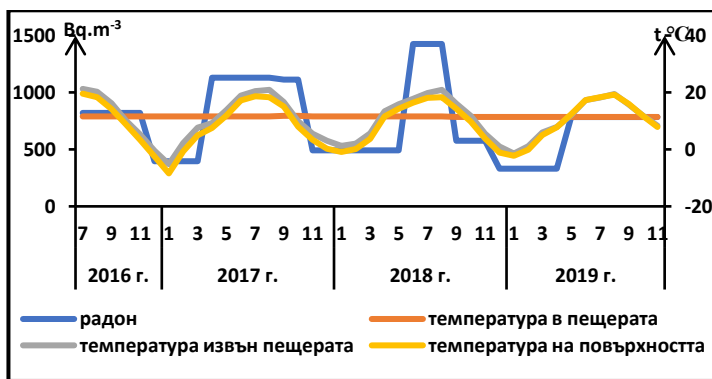
При този процес на активна вентилация, наситеният на радон въздух от пещерната атмосфера, се изнася навън, вследствие на това нивата на радон спадат.

Таб. 6.2. Коефициенти на корелация между нивата на радона в моделните пещери и елементите на външната атмосферата на годишна база. С удебелен шрифт са отбелязани статистически значимите.

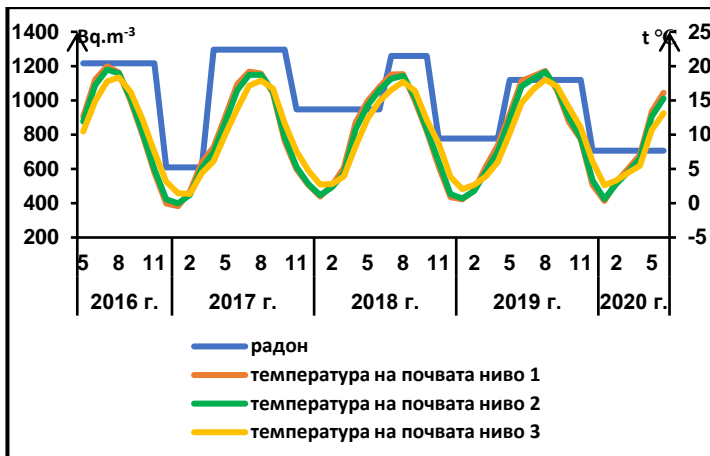
ИМЕ НА ПЕЩЕРАТА	средна температура за района	валежи	испарение	температура на почвата-1 ниво	температура на почвата-2 ниво	температура на почвата-3 ниво
ИВАНОВА ВОДА	0.68	-0.06	-0.57	0.69	0.67	0.59
СНЕЖАНКА ГОЛЯМА ЗАПА	0.80	0.26	-0.39	0.83	0.87	0.90
СНЕЖАНКА ВЪЛШЕБНА ЗАПА	0.89	0.57	-0.67	0.89	0.89	0.86
ТОПЧИКА	0.98	0.29	-0.60	0.93	0.90	0.93
ЧЕЛВЕЧНИЦАТА	0.36	0.23	-0.05	0.34	0.35	0.22
СТАРАТА	0.92	0.12	-0.53	0.82	0.82	0.82
ЮБИЛЕЙНА	0.28	0.13	0.00	0.29	0.31	0.41
ИМЕ НА ПЕЩЕРАТА	температура на почвата-4 ниво	температура на повърхността	снежна покривка във воден еквивалент	обемна влага в почвата-1 ниво	обемна влага в почвата-2 ниво	обемна влага в почвата-3 ниво
ИВАНОВА ВОДА	0.36	0.69	-0.50	-0.69	-0.58	-0.20
СНЕЖАНКА ГОЛЯМА ЗАПА	0.82	0.79	-0.82	-0.44	-0.39	-0.35
СНЕЖАНКА ВЪЛШЕБНА ЗАПА	0.56	0.89	-0.93	-0.20	-0.10	-0.13
ТОПЧИКА	0.93	0.93	-0.90	-0.81	-0.71	-0.33
ЧЕЛВЕЧНИЦАТА	0.12	0.35	-0.40	-0.12	-0.08	-0.10
СТАРАТА	0.65	0.83	-0.87	-0.43	-0.42	0.07
ЮБИЛЕЙНА	0.40	0.31	-0.20	-0.39	-0.36	-0.31

Обогатеният на радон въздух от спелеоатмосферата се заменя с външен въздух с ниска концентрация на радон.

През студеното полугодие нивата на радон в моделните пещери се контролират основно от разликата в температурата вън/вътре в пещерата, определяща режима на вентилация, нейната интензивност и продължителност. През топлото полугодие нивата на радон основно се контролират от интензивността на постъпването му в спелеоатмосферата от околната среда (от почвата над пещерата, от скалата и от налични води). В тази група пещери е налице права корелационна връзка между радона и температурните режими в почвата.



Фиг. 6.16. Корелация между активността на радона и температурата в пещерата Старата и температурата в района на пещерната система (период 2016-2020 г.).

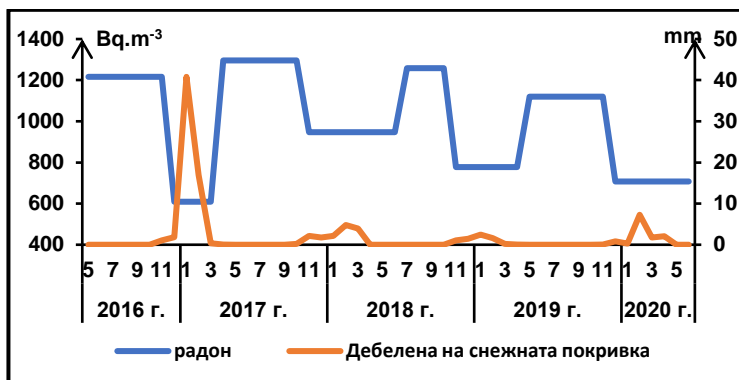


Фиг. 6.21. Корелация между концентрация на радона в пещерата Топчика и температурата на почвата в района на пещерната система (период 2016-2020 г.).

От проведенния анализ на обработените резултати и съставените графики следва изводът, че нивата на радон се контролират по-скоро от ниските температури през студеното полугодие, а не от абсолютната стойност на снежната покривка.

Анализирайки графиките на концентрациите на радон на всички моделни пещери и на количеството на валежите в техните райони не се установява никаква значима корелационна връзка (Фиг.7.3). Поради сложността на връзка между валежите, обемното съдържание на вода в почва в района на пещерите и обемната на радона в пещери е необходим многофакторен анализ. Той отчита не само падналите валежи, обемното съдържание на вода в почва и концентрация на радон но и вентилационните и температурни режими, които от своя страна зависят от

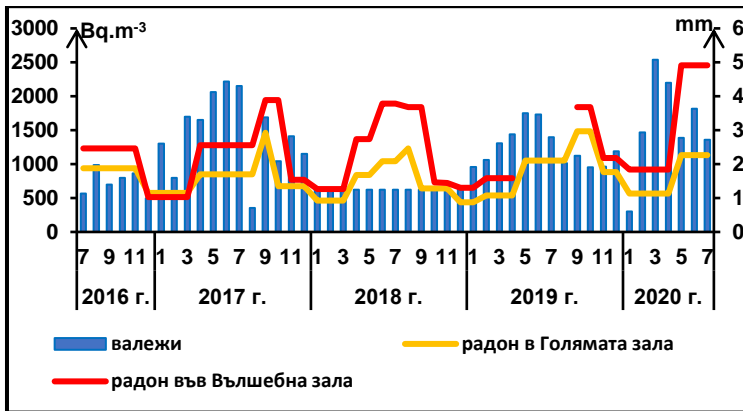
много фактори и условия, които на този етап не са проучвани.



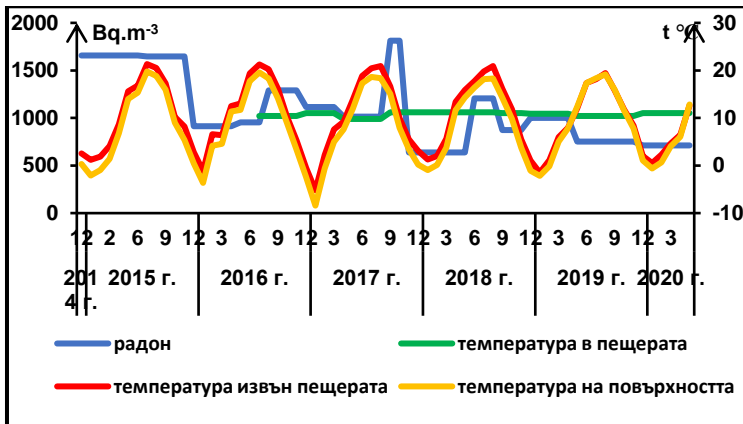
Фиг. 6.8. Концентрация на радона в пещерата Топчика и дебелина на снежната покривка в района на пещерата за периода 2016-2020 г.

Във **Втора група** попада само пещерата Юбилейна. При нея не са установени статистически значими корелационни връзки между обемната активност на радона и климатичните елементи на външната атмосфера. Незначими обратни връзки са отчетени с температурните режими на въздуха и на почвата в района на пещерната система.

Влияние върху годишното разпределение на обемната активност на радона в пещерата вероятно оказва и протичащата през нея подземна река, както и наличието на пещерни седименти (пещерата се развива в алогенен тип карст). Вентилационните режими в пещерата са слаби поради особеностите на пещерната морфология.



Фиг.6.10. Корелация между концентрация на радона в пещерата Снежанка и валежите в района на пещерната система (период 2016-2020 г.).



Фиг.7.24. Корелация между концентрацията на радона и температурата в пещерата Юбилейна и температурата в района на пещерната система (период 2014-2020 г.).

Между валежите, снежната покривка и обемното съдържание на вода в почвата в района на пещерната система и обемната активност на радона в пещерата Юбилейна на този етап на изследванията не е разкрита корелационна връзка.

7. Изводи и Заключение

- Температурните режими в моделните пещери се определят от спецификата на тяхната морфология, вентилационния режим, наличните води и климатичните условия на района, в който са развити;
- Пространствените размери на спелеомикроклиматичните зони са специфични за всяка една от изследваните пещерите;
- Класическото разпределение на спелеоклиматичните зони (привходна, преходна, вътрешна) в някои от пещерите е модифицирано според спецификата на тяхната морфология (например ещера Снежанка и Юбилейна);
- Вентилационните режими на някои от моделните пещери са под влияние и на тектонски нарушения, по които се осъществява връзка с външната атмосфера;
- Обемната активност на радона в моделните пещери варира в широки граници. Тя следва

годишния ход на външните температурни условия, които определят сезонността на вентилационните режими. Като резултат през топлото полугодие нивата на радон са високи, през студеното полугодие са ниски;

- В пещера Юбилейна не е установена зависимост на нивата на радон от външните температурни режими. Специфичното годишно разпределение на обемната активност на радона е възможно да е предизвикано от протичащата през пещерата река или от пещерните седименти.
- Установено е увеличение на средната годишна температура за двата пещерни района с приблизителна 2 °С за периода 1979-2020 г. То вече се е отразило и в повишение на температурата в част от плитко развиващите се пещери (например пещера Снежанка и Челевечницата).
- Тенденцията през последните 42 г. на повишаване на средно годишната температура ще доведе до увеличаване нивата на радон в пещерите поради увеличаване продължителността на топлия период с ниско интензивни вентилационни процеси.

Карстовите територии обхващат обширни площи както в България, така и по света, поради което са обществено значими. Особено като се има предвид, че

са изградени от сложно устроени геосистеми с повърхностна и сложно устроена подземна част и са едни от най-уязвимите както на природни, така и на антропогенни въздействия. Поради това все по-актуално става изследването на пещерните системи и на тяхната атмосфера. Тя е във фокуса и на настоящата работа, която има за цел анализ на взаимовръзки между спелеоклимата и активността на радона в 6 моделни карстови пещери в Родопите. Изследванията са регулярни полеви и се провеждат от 2014 г. (за радон) и от 2016 г. (за спелеоклимата).

На базата на измерените температури в моделните пещери е направено спелеоклиматично зонирание, което отразява присъщата за пещерите индивидуалност. На този етап на изследване не може да се изведе обобщен модел за формирането на спелеоклимата. Сложността на неговото формиране и развитие изисква непрекъснат инструментален мониторинг, наличието на допълнителни данни за факторите и условията, които формират пещерната среда и на тяхна база многофакторен анализ. Тези проблеми затрудняват и опита за анализ на връзката между валежите и снежната покривка с разпределението на обемната активност в моделните пещери. Установена е ясна зависимост на нивата на радон само от външните температурни режими, което потвърждава водещата роля на вентилацията за активността на радона в пещерните системи.

Влияние върху състоянието на спелеоатмосферата в пещерните системи оказват и активните глобални промени на климата. То се проявява най-вече чрез промените в температурите на външния въздух, които контролират вентилационния режим в пещерите, а чрез него и активността на радона. Анализът и на малкото запазени архивни данни от микроклиматични измервания в изследваните пещери потвърждава тези изводи.

Карстовите геосистеми реагират с голямо закъснение на промените във външната среда, поради което е необходим дълъг период на режимни измервания и най-вече на инструментален спелеомониторинг. Проведените при настоящето изследване над 80 полеви експедиции са добра начална база за проследяване на въздействието на глобалните промени на климата върху спелеоатмосферата и карстовите процеси.

В перспектива е необходимо да се изгради система за непрекъснат интегриран инструментален мониторинг на избрани пещерни системи. Това е особено наложително в отворените за посетители пещери от гледна точка на тяхното опазване, проследяване на антропогенното натоварване и запазване здравето на персонала и посетителите. Интегрирания мониторинг ще даде възможност за

проследяване елементите на спелеоатмосферата и външната атмосфера.

Развитието на мониторинга на радон в българските пещери трябва да включи използването на активни инструментални измервания. Измерването на радон трябва да обхване както пещерния въздух, така и карстовите води, пещерните седименти и почвената покривка в района на пещерата. За прецизиране на индивидуалните дози на персонала работещ в туристическите пещери е необходимо определяне на фактора на равновесие между радона и дъщерните му продукти за всяка една пещера.

Пещерните системи и карстовите геопаркове са специфични и уникални туристически обекти. С развитието на туризма все повече „диви пещери” стават обекти за туристически посещения (организирани или индивидуални) и комерсиална дейност. Но пещерите са силно уязвими системи, лесно податливи на трайни нарушения, особено на фона на засилващия се антропогенен натиск в карстовите територии и увеличаващият се туристопоток. Алтернативният и екстремният туризъм вече обхваща и трудно достъпни пещери, изискващи специални умения и екипировка. Това изисква провеждането в тях и на активна изследователска дейност, насочена както към опазването им, така и към осигуряване на безопасна среда за пребиваване на туристите и пещерници.

Необходими са допълнителни дейности за привличането, мотивирането и ангажирането на българската пещерна общност към изследователска дейност в пещерните системи. Съвместната работа между пещерняци и изследователи ще повиши значително ефективността при набавянето на така необходимите данни от научни измервания в дълбоки или труднодостъпни пещерни системи. Такава е и световната тенденция в съвременната спелеология, изразяваща се в организирането и финансирането на специализирани научно-изследователски експедиции.

Благодарности

Изказвам благодарности на научния си ръководител Доц. д-р Петър Ножаров и на научния си консултант Петър Стефанов за отделеното време и внимание, ценните съвети и конструктивните дискусии по въпросите, засягащи настоящия дисертационен труд, както и за оказваната помощ, търпение и неоченима подкрепа през целия период на работа. Благодаря и на колегите от Института по ядрена физика на Чешката академия на науките и в частност на д-р Карел Турек за безвъзмездното предоставяне и обработка на детекторите за радон и за определянето на ефективните дози.

Проучванията в моделните пещерите в Западните Родопи се провеждат с подкрепата на Експерименталната лаборатория по карстология на НИГГГ–БАН, Спелео Клуб „Пълдин” гр. Пловдив и Българската Федерация по Спелеология. На всички колеги и приятели авторът изказва благодарност за съпричастността и помощта в тези изследвания.

Провежданите мониторингови изследвания в родопските пещери са включени в програмата на научно–изследователския проект „Съвременни въздействия на глобалните промени върху еволюцията на карста (на базата на интегрирания мониторинг в моделни карстови геосистеми в България)“, финансиран от ФНИ (Договор ДН 14/10, 20.12.2017 г.).

Приноси

1. Събрани са данни за периода от края на 2014 г. до 2021 г. за температурата и относителната влажност в 6 моделни (включително една туристическа) пещери в Западните Родопи, като на базата на тези данни е направено спелеоклиматично зонироване на моделните пещери. Установени са някои специфики в зонироването на различните пещери, дължащи се на тяхната морфология или други фактори.
2. Определена е концентрацията на радон в моделните пещери. Вътрешногодишният ход, както и средногодишните нива на концентрацията на радон са в пряка връзка с вентилационния режим на пещерите, който от своя страна зависи от тяхната морфология и външните климатични фактори.
3. Установени са връзките между концентрацията на радон в пещерите и външните климатични фактори. Основният фактор, който оказва значимо влияние върху концентрацията на радон в изследваните пещери е температурата на въздуха в района на пещерите.
4. Разкрити са промените в климата на двата моделни карстови района за периода 1979–2020 г. Тези промени показват статистически значимо нарастване на температурата на въздуха. То води и до нарастване на температурата на въздуха в плитко разположените пещери, но не и в тези, които са разположени на по-голяма дълбочина под земната повърхност. Това означава, че при последните периодът със слаба вентилация на въздуха ще се

увеличи, което от своя страна ще доведе и до увеличение на концентрацията на радон.

5. Определени са реалните индивидуални дози на екскурзоводите в туристическата пещера Снежанка, които на този етап не представляват опасност за тяхното здраве. Имайки предвид, че Снежанка е плитко разположена пещера, текущото и бъдещо покачване на температурата на въздуха в района не се очаква да доведе до опасно за здравето покачване на концентрацията на радон в пещерата.

Научни публикации по докторската теза

1. Кюркчиев Ст., (2016). Радиационна опасност от радон в карстови пещери. *Сборник научни трудове от Петата международна научна конференция „Географски науки и образование”, Шумен стр. 57-64.*

2. Кюркчиев Ст., (2019). Микроклиматична характеристика на пещерата Челевчици в Западните Родопи. *Известия на Българското географско дружество, Том 41, стр. 10-17.*

3. Кюркчиев Ст., (2020). Микроклимат в моделни карстови пещери в Западните Родопи. *Проблеми на географията книга 3, стр. 118-135.*