



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ЗА КОСМИЧЕСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ



Любомира Недялкова Райкова

**Влияние на слънчевата активност върху температурния режим
на въздуха в карстови пещери**

**автореферат
на
ДИСЕРТАЦИЯ**

за присъждане на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

научна специалност:
„Физика на океана, атмосферата и околоземното пространство“

Научен ръководител: доц. д-р Алексей Стоев

Съдържание:

Увод

Въведение

Актуалност

Предмет на изследванията

Цел на дисертацията

Задачи за постигането на целта

Глава 1: Обзор на съвременното състояние на научния проблем.....9

1.1.Изследване на връзката между слънчевата активност и приземните климатични параметри

1.2. Пряко влияние на слънчевата активност върху пещерния климат

1.3.Влияние на слънчевата активност върху вторичните карстови образувания

Глава 2: Топлинен пренос в атмосферата.....12

2.1.Строеж на атмосферата

2.2. Климатични модели и уравнения за енергийния баланс.

2.2.1. Климатичен модел с един слой.

2.2.2. Климатични модели с два слоя.

2.3. Проводимост на топлината от земната повърхност в дълбочина

2.4. Параметри характеризиращи слънчевата активност

2.4.1. Слънчеви Петна и Цикли.

2.4.2. Индексът F10.7

2.4.3. Индексът TSI

2.4.4. Индекси, които отразяват геомагнитната активност

Глава 3: Методика на изследванията.....16

3.1. Статистически методи за изследване на времеви редове

3.1.1. Измерване на средна стойност на случайна величина

3.1.2. Корелационен анализ

3.1.3. Стандартна грешка на коефициент на корелация

3.2. Линейна регресия

3.2.1. Линейна регресия с две променливи

3.2.2. Множествена линейна регресия

3.3. Определяне на трендове на измерените редове

3.4. Хармоничен анализ

3.4.1. Ред на Фурие

3.4.2. Трансформация на Фурие

3.4.3. Спектър на мощността

3.4.4. Използван програмен език

Глава 4: Източници на данни използвани в дисертацията.....20

4.1. Характеристики на изследваните пещери

4.2. Използвани данни	
4.2.1. Температура в зоната на константните температури на изследваните пещери	
4.2.2. Приземна температура	
4.2.3. Характеристики на слънчевата активност	
4.2.4. Характеристики на геомагнитната активност	
Глава 5: Резултати.....	23
5.1. Изследване на температура в ЗКТ (зоната на константната температура) на пещерите Съева Дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица и слънчевите параметри.	
5.2. Изследване на приземната температура в градовете Враца, Ловеч и Смолян и слънчевите параметри	
Глава 6: Изводи, приноси и перспективи.....	42
6.1 Изводи	
6.2 Приноси	
6.3 Перспективи	
Благодарности	
Използвани литературни източници	

Списък на приетите съкращения:

TSI- пълна слънчева радиация

S_n - Брой слънчеви петна

A_p - Геомагнитна активност

ЗКТ- Зона на константните температури

NAO- Северно Атлантическа Осцилация

ACRIM- Активни радиометри за мониторинг на слънчева радиация

SORCE- Експеримент за слънчева радиация и климат

NOAA- Национална администрация по океанските и атмосферните изследвания

ГКЛ- Галактически космически лъчи

СГТ- Средногодишна температура

СМЕС- Коронално Масово Изхвърляне

SIDC Център за анализ на данни за слънчевото влияние

RMS Квадратен корен от средното аритметично на квадратите

НИМХ-БАН Национален институт по метеорология и хидрология - Българска академия на науките

SILSO Индекс на слънчевите петна и дългосрочни слънчеви наблюдения

GFZ Център за геонаучни изследванията

БТС Български Туристически Съюз

DFT Дискретно Фурие преобразуване

FFT Бързо Фурие преобразуване

В дисертационния труд са включени 27 фигури и 5 таблици.

Увод

От древните времена до съвременността, Слънцето е било предмет на преклонение, възхвала, интерес и научно изследване (Singh, 1998). Като основен източник на светлина, топлина и енергия, Слънцето винаги е играло ключова роля в живота и културата на различните цивилизации. Древните култури като египтяните, инките и майите, например, са развили култ към Слънцето и са създали календари, базирани на движението и циклите на Слънцето (Gullberg, 2015; Guardiola et al., 2014; Zuidema, 1982). Те са го възприемали не като естествено явление, а като божествено същество, което има изключително важно влияние върху живота на земята.

За съвременната цивилизация важноста и интереса към Слънцето се проявяват с в интердисциплинарните изследвания с прилагане на модерни технологии научни изследвания, прилагани от модерните технологии. Научните изследвания са основа за разбирането и предвиждането на слънчевите изригвания, видовете слънчев вятър, геомагнитните бури, слънчевото излъчване и космическите лъчи, което води към разкриване на фундаментални процеси във вселената (Bale et al., 2016; Thernisien et al., 2009; Golub et al., 2007). С помощта на телескопи и космически мисии, учените са успели да разберат много от физическите процеси, които се проявяват във вътрешната част на слънчевата корона и вътрешната част (Buzulukova and Tsurutani, 2022; Curto, 2020).

Благодарение на научните изследвания, се установява огромното значение на слънчевите процеси за земната атмосферата и земната кора. Неизчерпаем източник на информация за влиянието на слънчевата активност върху земната кора се съхранява в пещерите.

Около 75% от общата маса на атмосферата и по-голямата част от водните пари в нея се намират в тропосферата. Под тропосферата е повърхността на Земята. Но вътре в планините, под повърхността - в пещерите, се съдържат въздушни маси, които също са от тропосферата.

Атмосферата на пещерите обикновено е включена в процесите, които се случват във външната атмосфера. Циркулацията на въздуха в пещерите е част от най-общата циркулация на въздуха в атмосферата. Това е същият въздух, там протичат същите основни атмосферни явления, важат същите физични закони. Слънчевото лъчение е основният източник на енергия, която захранва климатичната система и позволява съществуването на биосферата (Sirakova, 2000). Климатът варира в отговор както на антропогенни и на природни въздействия, така и на вътрешни колебания. За да се изследва механизмът на промените в атмосферната циркулация, е много важно да се получат климатични данни с висока разделителна способност и дългосрочен период. Пещерите в България обикновено се развиват в карстови масиви - специален тип ландшафт, който се образува от разтворими скали, включително варовик и доломит. Ето защо там се съхраняват по-точни данни за промените в околната среда, отколкото при повечето други геоложки условия. Спелеологията, науката за пещерите, изучава подземните пещери в земната кора, достъпни за човека (Ford and Williams, 1989). Един от основните раздели на спелеологията е спелеоклиматологията – или науката за микроклимата в пещерите. Температурата, миналите валежи, естеството на почвата и растителната покривка, замърсяването, съставът на въздуха, залежаването, речната ерозия и отлагания и потоците подпочвените води обикновено могат да бъдат разчетени с различни техники (луминесценция например) от пещерни спелеотеми и отлагания.

Получените времеви редове са с продължителност стотици хиляди години и трябва да бъдат калибрирани чрез инструментални записи. По този начин голям брой параметри на глобалните промени могат да бъдат реконструирани.

Основите на спелеоклиматологията са положени от Листов, Крубер, Волф и много други учени, които правят своите изследвания в края на 19 и началото на 20 век. През 60-те и 70-те години на 20-ти век се натрупват факти и се подобряват методите на изследване.

Друг важен проблем е антропогенното въздействие върху климата. За да знаем какви промени в околната среда могат да се дължат на човешка дейност, обаче, е необходимо да идентифицираме тези, протичащи по естествени причини.

Пещерите в България са археологически съкровищници, запечатани с невероятно наследство за човешката история и култура. Те служат като времеви капсули, запазвайки следи от праисторически времена до днешни дни. В пещерните галерии се намират рисунки, гравюри, артефакти които предоставят важни данни за живота, вярванията и технологиите на древните цивилизации (Pike, 2012; Goldberg and Sherwood, 2006; Delannoy et al., 2013; Hoffmann et al., 2018).

Изследванията върху пещерите се провеждат чрез археологически разкопки и анализ на образците чрез използване на съвременни технологии (McPherron et al., 2009; Núñez et al., 2013).

Изследванията върху Слънцето и пещерите играят ключова роля за нашето разбиране на историята, културата и еволюцията на човечеството. Те предоставят ценна информация за връзката между човека, природата и космоса, като ни помагат да създадем по-цялостна картина за миналото и бъдещето на нашата планета и вселената.

С нарастването на научните изследвания върху слънчевата активност, изследователите са достигнали до важни заключения за влиянието на Слънцето върху пещерната среда. Технологичният напредък и интердисциплинарният подход позволяват да се извлече нова информация за връзката между слънчевата активност и околната среда в пещерите. Проведени са редица анализи за да се установи как слънчевите изригвания и вариациите в слънчевата активност могат да се отразят върху формирането на пещерните структури, химичните процеси и климатичните промени в пещерите (Duan et al., 2014; Brahim et al., 2018; Bhowmik et al., 2018; Muñoz-Jaramillo et al., 2019).

Също така, изследователите се фокусират върху възможните връзки между слънчевата активност и различни аспекти на живота в пещерите. Те проучват възможните влияния върху животните, растенията и човешките общности, които са обитавали пещерите през различни исторически периоди. Анализът им включва не само физическите ефекти, но и социалните и културните последици от въздействието на слънчевата активност върху развитието на пещерните общности. Тези изследвания предоставят ценни данни за влиянието на слънчевата активност върху човешката еволюция, развитието на различните култури и адаптацията към променящите се климатични условия (Mammola, 2018; Falasco et al., 2014; Chanover et al., 2023; Tomczyk-Żak et al., 2016).

Изследователите също така се стремят да разберат как слънчевата активност може да бъде използвана за прогнозиране на бъдещи климатични и екологични промени в пещерната среда. Техните усилия са насочени към развиването на модели и методи, които могат да помогнат за предвиждане на възможни последици от влиянието на слънчевата активност върху пещерните екосистеми и човешките общности, които са свързани с тях (Zhao et al., 2020; Liu et al., 2019).

Предвид интереса на световните учени към темата и вдъхновени от успешните практики и научните открития в други страни, българските изследователи също се ангажират със собствени научни проекти и изследвания в областта.

Българските спелеолози и учени са едни от първите, които изследват микроклимата в пещерите. В този процес те активно използват новите технологии, методи и принципи (Shopov et al., 1990; Shopov et al., 1994; Shopov, 2004; Shopov et al., 1996). Със стремежа към

създаване на собствена научна база и развиване на международни партньорства, българските изследователи използват своят опит, за да допринесат за по-доброто разбиране на този сложен проблем. В резултат от тяхната инициатива и проучвания, се наблюдава значителен напредък в изследванията на влиянието на Слънцето върху микроклимата в пещерите (Stoeva and Stoev, 2005; Stoev et al. 2019; Stoev et al., 2015; Stoeva et al., 2006).

Актуалност на темата

Съвременните научни изследвания продължават да разглеждат връзките между микроклимата на карстовите среди и слънчевата и геомагнитната активност с цел по-доброто познаване и предвиждане на климатичните промени. Тези промени се очаква да се засилят в бъдеще под влиянието на глобалното замърсяване и изменението на климата (Akimoto, 2003; von Schneidemesser, 2015). В контекста на настоящата глобална ситуация, която се характеризира с увеличаване на водните кризи и в снабдяването с питейна вода (Konikow and Kendy, 2005) карстовата хидрогеология предлага основни решения за снабдяване на човечеството с вода. Карстовите източници играят ключова роля, като този ресурс обслужва близо 10% от световната популация (Olarinoye et al., 2020), но въпреки това само около 4% от глобалната годишна възобновяема карстова подземна вода в момента се използва (Stevanović, 2019). Осмислянето на микроклиматичните параметри в карстовите масиви и тяхната връзка със слънчевата и геомагнитната активност е от съществено значение за устойчивото управление на този критичен ресурс. По-доброто разбиране на тази сложна връзка може да ни позволи да прогнозираме и интерпретираме измененията в микроклимата на карстовите среди, които биха могли да настъпят в резултат на изменения в слънчевата и геомагнитната активност.

Един от най-важните параметри, които се изследват в пещерните масиви е температурата.

Тя е от голямо значение за палеоклиматичните изследвания (Domínguez-Villar et al., 2013), но не само за палеоклимата, но и за съвременните изследвания. Следенето на температурата и разработването на пространствено-времеви математически модел на температурата на въздуха в пещерата се оказва ценен инструмент за екологичното управление на избраните пещери, което позволява преценка на екологичните рискове, при публичните посещения. (Fernández-Cortés et al., 2006).

Baker and Genty (1998) подчертават важноста от наблюдение и контрол на температурата в пещерите от въздействието на човешко присъствие върху подземния климат и потенциалните разрушения на спелеотемите в резултат на увеличени концентрации на CO₂ и повишени температури. Измерването на температурата е от съществено значение, тъй като това позволява да се следят детайлно промените в микроклимата, които могат да бъдат предизвикани и от влиянието на посетителите на пещерата. Такива наблюдения са важни за определяне на ефектите от туристическата дейност върху околната среда и за планирането на устойчиво управление на пещерните обекти (Buzjak, 2017).

Температурата играе ключова роля в определянето на физически, химически и биологични процеси в околната среда, включително климата, разпространението на животински и растителни видове, както и формирането на геоложки обекти като спелеотеми (Ersek et al., 2009). Важноста на наблюдаването на температурата в пещерите произтича от тясната връзка между глобалния климат и температурата в тези подземни обекти. Структурните и физическите характеристики на пещерите, както и тяхната географска локация, ги правят уязвими към въздействието на измененията във външния климат. Глобалните климатични промени, като изменения в температурата на земната повърхност и колебанията в климатичните явления, могат да имат дългосрочни последици върху температурата и климата в пещерите. Промени във външната температура могат да повлияят на термалния обмен между атмосферата и пещерите, което може да предизвика изменения във вътрешната температура и

климат в тези подземни пространства. Следователно, редовното следене на температурата в пещерите е важно за разбирането на техните екосистеми и за опазването на техните уникални екологични и геоложки характеристики (Badino, 2004).

ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА:

Фокусът на настоящата дисертация е насочена към анализа на Слънчево-Земните връзки и тяхното значение за температурата в някои карстови пещери в България.

ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:

Определяне на влиянието на слънчевата активност върху температурния режим на въздушната среда в зоната на константните температури на карстовите масиви.

ЗАДАЧИ ЗА ПОСТИГАНЕТО НА ЦЕЛТА:

Въз основа на данни за температурата в Зоната на Константните температури в 4 благоустроени пещери в България - Снежанка, Ухловица, Съева дупка и Леденика, за периода 1968 – 2022 г. и данни за броя на слънчевите петна, слънчевото радиоизлъчване при дължина на вълната 10.7 cm (2800 MHz) и пълната слънчева радиация се анализира, оценява и дискутира влиянието на слънчевата и геомагнитна активност върху микроклиматичните параметри в пещерите.

1. Първична подготовка на данните за слънчева активност, както се използва техни индикатори: брой слъчевите петна (S_n), индексът F10.7 - слънчевото радио излъчване при дължина на вълната 10.7 cm, пълна слънчева радиация (TSI) и геомагнитна активност (A_p).
2. Подготовка на данните за температурата в Зоната на Константните температури за четирите пещери: Снежанка, Ухловица, Съева дупка и Леденика.
3. Подготовка на данните за приземната температура за трите града Ловеч, Враца и Смолян намиращи се в близост до благоустроените пещери.
4. Методика на изследванията.
5. Изследване на температурните редове на карстовите пещери слънчевата активност и геомагнитната активност.

Глава 1. Литературен обзор

1.1. Изследване на връзката между слънчевата активност и приземните климатични параметри

Слънчевата активност представлява един от важните параметри, които характеризират влиянието на Слънцето върху климата на Земята. През годините, научната общност е натрупала значително знание за механизмите на въздействие на слънчевата активност върху земния климат. Въпреки това, както подчертава Tsiropoulou (2003), все още съществува неяснота относно някои механизми и степента на това влияние.

Циклите на слънчевата активност влияят на различни климатични параметри, както и на компонентите на хидрологичния цикъл: дъждове, снежна покривка и др. Това влияние се получава основно поради вариациите в пълната слънчева радиация (TSI), последвани от промени във времето и климата (Charanov et al., 2019).

1.2. Пряко влияние на слънчевата активност върху пещерния климат

Въздухът в пещерите обичайно е под влиянието на процесите, които протичат във външната атмосфера. Циркулацията в тях е част от по-общото движение на въздуха. Дори такива консервативни среди като въздуха в карстовите пещери реагират на вариациите на климата, слънчевата и геомагнитната активност. Stoeva and Stoev (2005); Stoeva et al. (2006) изследват реакцията на температурата на въздуха в пещерите на климата, слънчевата и геомагнитната активност за четири пещери в България за период от 36 години (1968 - 2003). В изследването са използвани ежедневни измервания в обедно време в пещерите Леденика, Съева дупка, Снежанка и Ухловица. Показанията в пещерите в зоната на константните температури са сравнени с тези на повърхността, регистрирани в метеорологични станции, разположени близо до пещерите - в градовете Враца, Ловеч, Пещера и Смолян. За сравнение са изследвани също пещерите Хансен, Юта, САЩ (геогр. ширина 40.27° , геогр. дължина 111.43°). Установено е, че корелацията между времевите редове на температурата на въздуха в пещерите и броя на слънчевите петна е по-добра, отколкото тази между температурата на въздуха в пещерите и Ар индекса. Температурата в е по-скоро свързана с първия пик в геомагнитната активност, който е асоцииран със слънчевата активност (CMEs), отколкото с втория, който е по-висок и свързан с повтарящите се бързи потоци плазма от коронарни дупки. Ясно е изразен известният механизъм на адиабатно охлаждане - сухият повърхностен въздух понижава температурата на този в пещерата и изпарява вода от пещерната среда, което допълнително я охлажда. Може да се заключи, че тенденциите на температурата на повърхността зависят от климатичната зона, в която се намира пещерата. Освен това изследванията на климатичните тенденции в разгледаните четири български пещери от 1968 до 2003 година показват, че годишните средни температури на въздуха корелират по-добре с броя на слънчевите петна, отколкото с геомагнитната активност.

Stoev and Stoeva (2019) извършват анализ на влиянието на слънчевата активност в карсови пещери, като акцентът се поставя върху промените в температурата. Поради факта, че пещерите от карст запазват дългосрочните промени в околната среда, изследването на атмосферните параметри в пещерите и техните вариации с времето е много важно и добива огромна популярност през последните години. Изследвана е еволюцията на температурата и налягането на приземния атмосферен слой във времето, измерени близо до входовете на две български карстови пещери: Снежанка (област Пазарджик) и Ухловица (област Смолян), през периода 2005–2017. Авторите показват, че топлинният и масовият обмен на въздуха на пещерите с околната среда има значителни изменения във времето. На годишна база термодинамичните параметри на наблюдаваните пещери са като на баротропичен флуид, при

който плътността на въздуха зависи само от атмосферното налягане. В резултат на това, налягането и температурата в пещерите се променят синхронно. Наблюдаваният 11-годишен цикъл може да се дължи на хелиосферната модулация на интензивността на галактическите космически лъчи (GCR), които, от своя страна, модулират озона и влажността в близост до тропопаузата и съответно – силата на парниковия ефект.

Stoev et all. (2023) разглеждат 13 праисторически астрономически обсерватории, като се прилагат методите на археоастрономията, за да се установят периода на тяхната активност. Наличието на голям брой такива археоастрономически обекти подсказва, че в региона е преобладавал благоприятен астроклимат. Използвайки тази информация, се цели да се извърши оценка на древния климат на територията на България за съответния исторически период. Тази оценка се основава на геологически данни и на измерванията на слънчевата инсолация чрез луминесценция на спелеотемите от пещера Духлата в село Боснек, община Перник, представляващи единствения наличен експериментален запис за слънчевата инсолация в Европа, обхванала последните 20 000 години.

Чрез детайлно изучаване на спелеотемите и влиянието на слънчевата активност върху пещерния климат, се оценява броя на ясните дни и нощи и се разглежда възможностите за успешни астрономически наблюдения на Слънцето по време на равноденствия и слънцестоене. За анализ се използват методите на „хоризонтната“ и меридионална астрономия. Показва се също, че климатът в края на ледниковата епоха е бил по-хладен от днешния, като преди около 11 700 години климатът започва да се затопля, което довежда до развитие на горска растителност на освободената от ледниците територия. Преди (6–8 хиляди години пр.Хр.) средната годишна температура на Балканския полуостров и по-специално в България е била с около 2–2,5 °C по-висока от днешната, което е условие за добър астроклимат и точни наблюдения на слънцето близо до хоризонта. Промените в климата (и съответно в астроклимата) влияят върху типа на праисторическите астрономически обсерватории - за наблюдения близо до хоризонта или меридионални кулминации на небесни тела. Подчертава се важността на изучаването на спелеотемите за разбирането на връзката между слънчевата активност и пещерния климат.

Stoev et all., (2016) представят изследване на хода на температурата на въздуха в приземния слой на атмосферата, намиращ се близо до четирите пещери - Съева дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица за периода 1968 - 2014 година. Данните са получени в рамките на подробния микроклиматичен мониторинг на пещерите и карстовите райони, в които те се развиват.

Средногодишният брой слънчеви петна и индексите A_p_{max} , описващи слънчевата и геомагнитната активност са взети от Националния геофизичен център, Боулдър, Колорадо. Установено е, че различната продължителност на слънчевите цикли и различната дължина на възходящата и низходящата част на кривата усложняват операцията по съгласуване на продължителността на един цикъл с друг. Точно поради това е използвана процедура по привеждане на отделните слънчеви цикли към един стандарт, използвайки за реперни точки годините на максимум и минимум. Така приведените към една дължина цикли са разделени на 10 фазови интервала. Всички данни са нормирани по такъв начин, че в хода на всеки 11 годишен слънчев цикъл максималната по модул стойност на изследваната величина е равна на единица. Резултатите от изследванията показват, че съществува положителна корелация между отклоненията на средногодишните, летни и есенни температури и слънчевата активност при западна фаза на квазидвугодишните вариации. Периоди с източна фаза на корелацията практически отсъстват от годишното сезонно разпределение на температурите. Средногодишните температури и при четирите пещери достигат своя максимум три години

след максимума на слънчевата активност. През зимата и пролетта се наблюдават отрицателни корелации между стойностите на температурите и броя на слънчевите петна.

Слънчевата активност оказва значително влияние върху климата на Земята, като това влияние може да бъде разглеждано както в директен, така и в индиректен аспект, особено когато става въпрос за пещерни системи.

1.3. Влияние на слънчевата активност върху вторичните карстови образувания

Научните изследвания, провеждани в България, се фокусират върху анализа на сталагмитите, и данните за слънчевата активност. Чрез метода базиран на "микрizonaлност на луминесценцията на пещерни сталактити" и лазерен анализ на луминесценция (LLMZA) се получава информация, която съдържа ценни данни за климатичните промени и колебанията на температурата, влажността и валежите през хилядолетията. (Dermendijev et al.). Тези данни имат критично значение не само за нашата страна, но и за глобалното разбиране на климатичните процеси и тяхното влияние върху околната среда.

Извършен е лазерен луминесцентен микрizonaлен анализ на полиран разрез на пещерен сталактит, който показва корелация между слънчевата активност и кръговете на нарастване на карстовото образувание. Предлага се идеята, че слънчевият вятър и промените в хелиосферата могат да доведат до антикорелация между галактичния поток от космически лъчи и слънчевата активност, и този ефект може да бъде използван за интерполация на миналата слънчева активност чрез радиоактивни изотопи. Могат да бъдат получени данни за слънчевата активност през периоди до седем милиона години, което е възрастта на най-старите пещерни сталактити (Shopov, et al., 1990).

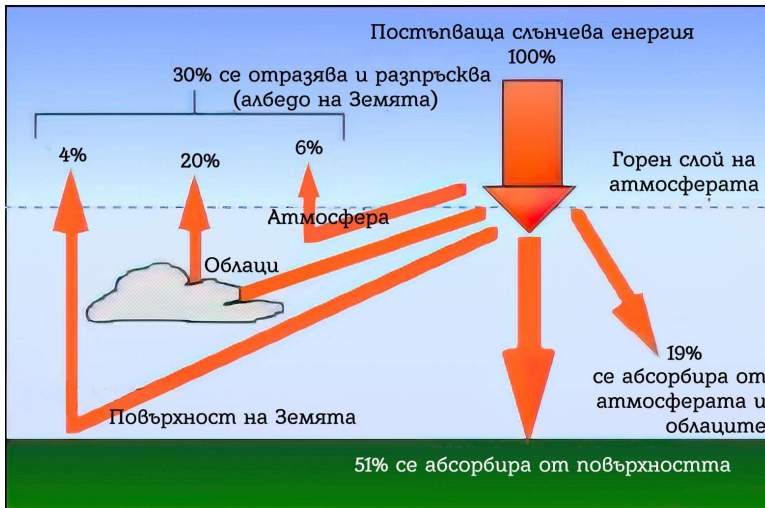
България, като част от Балканския полуостров, има уникално географско положение и разнообразие от пещерни системи и спелеотеми. Тези пещери и образуванията в тях са ценни източници на информация за историята на климата в региона и как той се свързва с глобалните климатични процеси. Спелеотемите предоставят висококачествени, добре запазени и дълговремени записи. Обаче те често се прекъсват поради изчезването на проникващите водни разтвори, които стимулират растежа на спелеотемите. Растеж на спелеотемите, който продължава непрекъснато в продължение на десетки хиляди години, е изключително рядък, а такъв, който продължава непрекъснато в продължение на стотици хиляди години, е уникален. Вижда се, че спелеотемите позволяват изключително висока резолюция (по-висока от всякакви други палеоклиматични наземни архиви) и дълъг период на записи. Някои спелеотеми могат да се използват като естествени климатични станции за получаване на количествени записи на климата с годишна резолюция (Shopov, 2004; Stoev et al., 2023).

Луминесцентното изследване в спелеотемите позволява проследяване на промените в растежа им за периоди от десетки години до един ден. Годишните колебания в умерените райони може да са свързани с климатични цикли. Те отразяват промени в растежа на калцита, диктувани от количеството вода и съдържанието на органични вещества в нея. (Shopov, 1989) Температурният отговор на въздуха в пещерите на климата и на слънчевата и геомагнитната активност е изследван за период от 36 години (1968 - 2003) в четири пещери в България. Средните годишни температури на въздуха в зоната на константни температури (t_{3KT}) са сравнявани със средните годишни повърхностни температури. Температурите в пещерната система Тимпаногос, Юта, САЩ са били разгледани за сравнение по идентичен начин (Stoeva et al., 2005), което помага за прогнозиране на бъдещите климатични промени и изграждането на стратегии за адаптация и управление на рискове. Така, научните изследвания в областта на спелеотемите играят важна роля в контекста на изменението на климата и нашето бъдещо разбиране на него.

2.Топлинен пренос в атмосферата

2.1. Строеж на атмосферата

Слънцето е основният двигател, който определя температурното разпределение в земната атмосфера. Енергията му влияе на температурните промени от земната повърхност до най-високите слоеве на атмосферата. На Фиг.2.1.1. е показано схематично разпределението на слънчевата енергия, навлизаща в атмосферата на Земята.



Фиг.2.1.1. Илюстрация на разпределението на слънчевата енергия, която достига до Земята, и как тя се абсорбира, отразява и разсейва в атмосферата и на повърхността на планетата. (Alksnis, 2019)

Ако приемем, че слънчевата енергия, достигаща до горната граница на атмосферата и навлизаща в нея, е 100%, то 30% от нея се отразява и разсейва обратно в космоса. Това се нарича алbedo на Земята. От тези 30% от слънчевата енергия 20% се отразява от облаците, 6% се отразява от атмосферата, и 4% се отразява от повърхността на Земята. От останалите 70% от слънчевата енергия, проникваща в атмосферата, 19% се абсорбират от атмосферата и облаците и 51% се абсорбират директно от повърхността на Земята.

активност директно влияе на температурата, като тук можем да наблюдаваме значително увеличение поради абсорбцията на по-интензивно слънчево излъчване.

2.2. Климатични модели и уравнения на енергийния баланс.

2.1. Модел на енергийния баланс с един тънък слой

Моделът с един тънък слой е основен климатичен модел, който предполага, че Земята е равномерно излъчващ черен обект без атмосфера. В този модел около 30% от енергията, получена от Слънцето $S_0/4$ във видимата област се разсейва обратно (планетарно или глобална алbedo α_g). Достигащата до земята енергия затопля повърхността и се трансформира в топлинна инфрачервена радиация, и се излъчва обратно в космоса.

$$S_0/4(1 - \alpha_g) = \varepsilon\sigma T^4 \quad (\text{Flath, Kaper, Wattenberg, \& Widiasih, 2012}) \quad (2.1)$$

2.2.2. Модели на енергийния баланс с два слоя.

Моделите с два слоя са по-сложни и дават по-реалистични резултати от модела с един слой. Те разглеждат взаимодействието между два различни слоя: повърхността на Земята и атмосферния слой. В тези модели се отчита абсорбцията на слънчевата радиация от земната повърхност и атмосферата, както и излъчването на инфрачервена радиация от двете.

Уравненията, които описват енергиен баланс в модели с два слоя, включват:

1. Абсорбция на слънчевата радиация
2. Излъчване от земната повърхност
3. Излъчване от атмосферния слой

В тези модели може да се отчита ефектът на парниковите газове и облаците в атмосферата, които абсорбират и излъчват инфрачервената радиация, оказвайки влияние върху глобалната температура на Земята. Този вид модели позволява по-точно разбиране на климатичните процеси и прогнозиране на климатичните промени.

$$\sigma T_S^4 - 2\sigma T_A^4 = 0 \quad (\text{Flath, Kaper, Wattenberg, \& Widiasih, 2012}) \quad (2.2)$$

2.3. Проводимост на топлината от земната повърхност в дълбочина

Когато слънчевата радиация преминава през атмосферата, молекулите в нея, основно водни пари, абсорбират радиацията в специфичен спектрален диапазон. Този процес допринася за затоплянето на атмосферата, която от своя страна затопля повърхността на Земята. Проникването на температурните вълни (дневни или годишни) в повърхностния слой на Земята може да бъде описано чрез процеса на топлопроводимост.

Решението на уравнението за топлопроводимост с две гранични условия. Едното, което се отнася за повърхността на земята, а другото за безкрайна дълбочина.

$$u(x, t) = u_{max} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x\right) \quad (2.3)$$

Където

$\omega = 2\pi/T$ T може да бъде заместено от T/n (хармоници) или $n \cdot T$

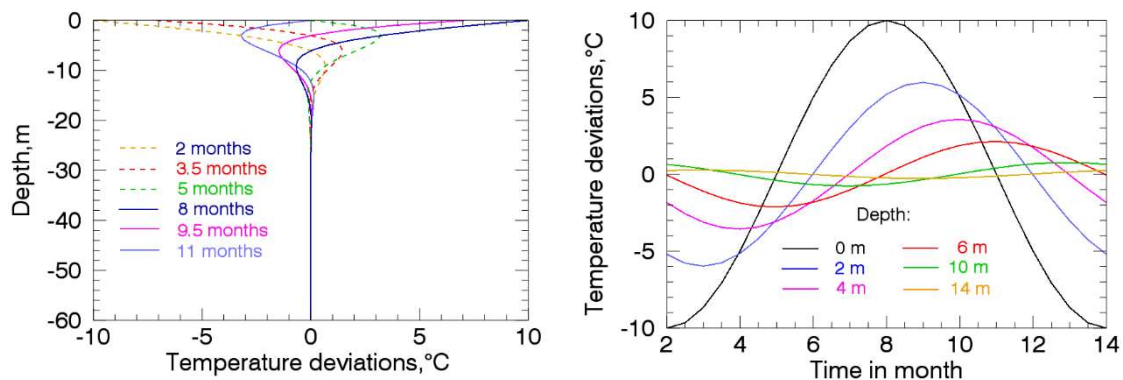
$e^{-\sqrt{\frac{\omega}{aT}}x}$ описва затихването на амплитудата на дълбочината x , хармониците затихват по-силно, а температурните колебания с по-големи периоди достигат до по-големи дълбочини.

$-\sqrt{\frac{\omega}{aT}}x$ описва нарастването на фазовото отместване, което нараства линейно с дълбочината.

Плътността ρ и специфичната топлина зависят силно от съдържанието на вода. Карстовите формации обикновено са влажни. Anjum and Rasool (2020) са изследвали типични карстови образувания и са взели проби от различни височини на образуванието. Взетите проби показват влагосъдържание до насищане. Те показват, че $a = \lambda/\rho c$ се увеличава за изсушени проби с около 60%. Стойността на параметъра a е определена на около $2 \text{ mm}^2/\text{s}$. С този параметър е пресметнато решението на уравнение (2.3).

На Фиг.2.3.1 а) е показан температурен профил за температурна вълна с период от 12 месеца.

Амплитудата прониква с течение на времето на все по-големи дълбочини. Така например през май месец максимумът е на около -4 m, през средата на юни е около -6 m и през август - на около -9 m. Температурните вариации затихват на дълбочина около 20 m. Фиг.2.3.1 б) показва как се променя температурната вълна както функция от времето за различни дълбочини спрямо земната повърхност в продължение на една година и как се променят фазите. Амплитудата на вълната с нарастване на дълбочината намалява, а фазата нараства. На 2 m дълбочина максимумът на амплитудата е около 6°C и се наблюдава през септември, т.е. 1 месец след първоначалния максимум от 10°C през август. На дълбочина 14 m температурните отклонения през годината вече са под един градус, а фазовото отместване е повече от шест месеца.

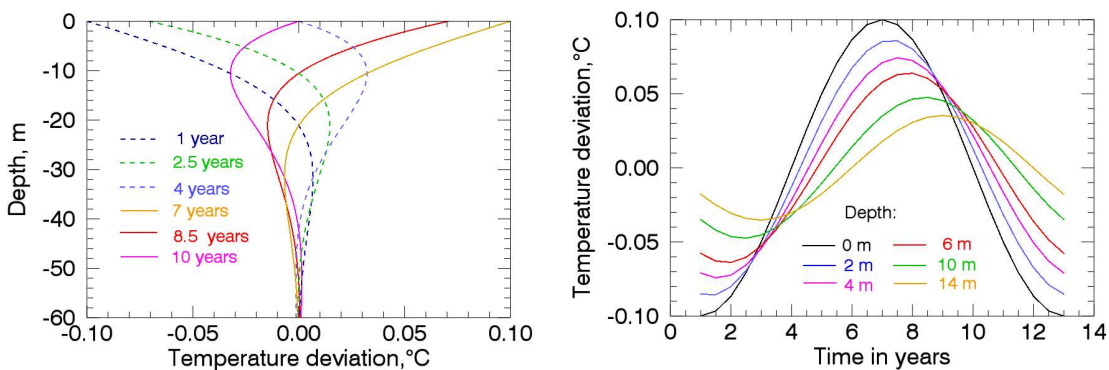


a)

б)

Фиг.2.3.1. а) Профили на температурната вълна, съответстваща на годишен цикъл с амплитуда 10°C, в зависимост от дълбочината за определени моменти от време, написани в легендата; б) Изменение на температурите и промяна на фазите през годината за различни дълбочини в зависимост от годишното време. Фигурите така са начертани така, че максималната температура се получава през август.

Фиг. 2.3.2. представлява ходът на температурната вълна както Фиг. 2.3.1., но за Слънчев цикъл с приет период 12 години и с амплитуда 0.1°C. От Фиг.2.3.2.а) се вижда, че вълната достига много по-големи дълбочини в сравнение с 1-годишния цикъл. А фазовото отместване (виж Фиг. 2.3.2.б) при 12-годишния цикъл е от порядъка на няколко години.



a)

б)

Фиг.2.3.2 а) Температурни профили на температурната вълна, съответстваща на 11-годишен слънчев цикъл с амплитуда от 0.2°C, за различни моменти на времето. б) представени са температурните изменения и фазовите отмествания за различни дълбочини в продължение на 12 години. Фигурте са начертани така, че максимум на температура, съответстващо на

максимум на слънчевия цикъл се приема 6 години след първата година.

2.4. Параметри характеризиращи слънчевата активност

Слънчевата активност се проявява чрез множество явления, които се генерират от динамични процеси във вътрешността на Слънцето и в слънчевата атмосфера. Основни параметри, характеризиращи слънчевата активност, са броят слънчеви петна (S_n), мощността на електромагнитните вълни с дължина около 10.7 сантиметра (F10.7), и общата слънчева радиация (TSI).

2.4.1. Слънчеви Петна и Цикли.

Слънчевите петна са видими области на слънчевата повърхност (фотосферата), които са значително по-хладни и по-тъмни в сравнение с околната фотосфера. Те са индикатор за слънчевата магнитна активност, и възникват в резултат на концентрация на магнитни полета, които инхибират конвективния транспорт на енергия от вътрешността на Слънцето към повърхността. Броят и размерът на слънчевите петна варират в рамките на приблизително 11-годишни цикли, познати като слънчеви цикли, които отразяват колебанията в магнитната активност на Слънцето.

2.4.2. Индексът F10.7

Индексът F10.7 е числен показател за интензитета на слънчевото излъчване, представен чрез мощността на електромагнитните вълни с дължина около 10.7 сантиметра (или 2800 MHz в радиочестотен спектър), който служи за оценка на активността на Слънцето. Този индекс започва да се следи от май 1947 година, което поставя началото на постоянното наблюдение на слънчевата активност и нейното влияние както върху Земята, така и при различни астрофизични изследвания на Слънчевата система.

2.4.3. Индексът TSI

Измерванията на Общата слънчева радиация (TSI) започват през 1978 г., използвайки данни от множество сателити. Те се осъществяват чрез специализирани инструменти, наречени Active Cavity Radiometer Irradiance Monitors (ACRIM). Тези уреди са разработени с цел измерване на измененията на слънчевата радиация с изключителна точност и надеждност. Основните измервателни кампании включват ACRIM-I и ACRIM-II, като първоначално данните се коригират и съгласуват помежду си за периода преди старта на ACRIM-I през 1980 г. и за времето между ACRIM-I и ACRIM-II. През 1996 г. започват измервания със сателита VIRGO, чиито данни се коригират, за да съответстват на тези от ACRIM-II (NOAA NCEI).

2.4.4. Индекси, които отразяват геомагнитната активност

A_p , известен още като „Amplitude of regular daily variations in the geomagnetic field” или „amplitude of planetary daily geomagnetic variation”, е разработен в средата на 20-ти век и е от особена важност за геофизическите изследвания за мониторинг на дългосрочни тенденции в геомагнитната активност.

Глава 3. Методика на изследванията

3.1. Статистически методи за изследване на времеви редове

3.1.1. Измерване на средна стойност на случайна величина

При достатъчен брой измервания, законът за Нормалното разпределение се счита за валиден. Средната стойност се пресмята по формулата:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1),$$

където \bar{x} е средната стойност на измерванията, x_i представлява стойността на i -тото измерване във време t_i или i -тия елемент на времевия ред, и n е общият брой измервания.

Средноквадратичната грешка се получава от уравнението :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

σ е средноквадратичната грешка на единичното измерване и характеризира ширината на кривата на разпределение или разброса на x_i относно средната стойност на x .

Дисперсията на разпределението σ^2 е дефинирана като:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.3),$$

Статическата оценка на дисперсията е:

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.4)$$

3.1.2. Корелационен анализ

Коефициентът на корелация на Пиърсън е безразмерен индекс, който е инвариантен към линейни трансформации на която и да е от променливите. Пиърсън първоначално разработва математическата формула за тази важна мярка през 1895 година (Johnson and Wichern, 2007) :

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.5)$$

където x_i и y_i са конкретни стойности на две променливи, \bar{x} и \bar{y} са средните стойности на съответните променливи.

Сумите са изчислени за всички данни в множеството. Коефициентът на Пиърсън често се нарича и линейен корелационен коефициент, защото представлява мярка на сила на линейна корелация между две променливи.

3.2. Линейна регресия

Линейната регресия е статистически метод, който се използва за изследване на връзката между една зависима променлива и една или повече независими променливи. Основната цел на този метод е да се определи дали и до каква степен съществува линейна зависимост между

променливите, както и да се създаде модел, който може да предсказва стойностите на зависимата променлива на базата на стойностите на независимите променливи.

3.2.1. Линейна регресия с една променлива

Моделът на линейната регресия с една независима променлива е:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (3.6)$$

където:

- y е зависимата променлива,
- β_0 е константата
- β_1 е коефициентът на регресия,
- x е независимата променлива,
- ϵ е случайната грешка.

3.2.2. Множествена линейна регресия

В случай на повече от една променлива множественият линеен модел е:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k. \quad (3.7)$$

3.3. Определяне на трендове на измерените редове

Както беше изтъкнато по-горе, основните компоненти на времевия ред са две: една компонента, описваща сезонни или циклични промени и една гладка компонента, описваща тренда. Коя от компонентите стои във фокуса на научния интерес, зависи от областта на науката и от конкретното изследване.

Линеен тренд

Линейният тренд предполага, че развитието на изследвания процес се променя с постоянна скорост. Линейният тренд може да бъде апроксимиран с права линия, която минимизира разстоянията до всички наблюдавани точки в даден набор от данни. В математическия модел на линейната регресия, линейният тренд се изразява чрез уравнението:

$$y = \beta_0 + \beta_1 t, \quad (3.8)$$

където β_0 представлява константа, а β_1 е скоростта, с която протича процеса.

Квадратичен тренд

Понякога данните не следват проста линейна зависимост и показват по-сложна връзка с времето. В такива случаи се използва квадратичен тренд, който добавя член с квадрат на независимата променлива в уравнението:

$$y = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (3.9)$$

Този модел позволява на кривата да се огъва, което е полезно за описание на нелинейни зависимости, където скоростта на промяна не е константна. Квадратичният тренд е подходящ за данни, които показват ускоряваща или забавяща промяна. Примери за това включват анализ на растежа на растенията в зависимост от дозата на торовете или изследване на връзката между възрастта и някаква когнитивна способност.

Полиномни трендове

Полиномните трендове включват членове с по-висок ред.

$$y = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \dots + \beta_n t^n \quad (3.10)$$

3.4. Хармоничен анализ

Основната идея на хармоничния анализ е, че всяка периодична функция може да бъде представена като сума от синусоиди с различни честоти и амплитуди.

3.4.1. Ред на Фурие

Предложеното от Жан-Батист Жозеф Фурие, развитие на функции с основен период T , в ортогонални базиси, в случая на синусоиди, е ключово в анализа на периодични сигнали и има широко приложение в различни научни и инженерни области.

Сумата на безкраен брой синусоиди се нарича ред на Фурие и включва основната честота на функцията и нейните хармоници.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) \right) \quad (3.11)$$

Периодичността на функцията е фундаментална за приложението на редовете на Фурие, тъй като тя позволява функцията да бъде разглеждана като повторение на същата форма върху всеки период. Но даже основната функция да не е периодична, тя може да бъде периодично продължена.

Коефициентите на реда на Фурие може да се определят и чрез линейна регресия. Освен това могат да се определят коефициенти на тренда (линеен или полиномиален) съвместно с коефициентите на реда на Фурие (Charapov et al., 2015)

3.4.2. Спектър на мощността

Спектърът на мощността се основава на теоремата на Парсевал, която гласи, че сумата на квадратите на амплитудите на времевия сигнал е равна на сумата на квадратите на амплитудите на неговите честотни компоненти:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (3.12)$$

Тази теорема осигурява теоретична обосновка за изчисляването на спектъра на мощността (Power Spectrum). От теоремата следва, че пълната енергия във времето и честотното представяне е една и съща, или с други думи не зависи от нейното представяне. Теоремата е важен инструмент в анализа на сигнали, който разкрива

разпределението на мощността на сигнала по честоти и предоставя информация за честотните компоненти на сигнала и тяхната енергийна значимост.

Мощността на сигнала е мярка за енергията, която сигналът пренася за единица време. За периодични сигнали мощността може да се изрази като средната стойност на квадрата на амплитудата на сигнала:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt. \quad (3.13)$$

Тук P е средната мощност, T е периодът, а $x(t)$ е сигналът.

Спектърът на мощността представлява разпределението на мощността на сигнала по честоти.

$$P(f) = |(X(f))|^2 \quad (3.14)$$

3.4.3. Нормиран спектър на мощността

Процесът на нормиране включва деление на спектъра на мощността на сигнала на общата мощност на сигнала. Общата мощност на сигнала може да бъде изчислена чрез интегриране на спектъра на мощността в цялата честотна област:

$$P_{total} = \int_{-\infty}^{\infty} P(f) df \quad (3.15)$$

Приложение на нормирания спектър на мощността

Спектърът на мощността е особено полезен в следните приложения:

- Сравнение на сигнали: Позволява сравнение на честотните характеристики на сигнали с различна мощност.
- Характеризация на шум: Използва се за анализ на шума и идентифициране на честотните компоненти, които съдържат повече енергия.
- Спектрален анализ

За да осигурим надеждността на получените резултати, ще приложим израза

$$\frac{N |\hat{X}_k|}{\sigma^2} \hat{\sim} \frac{1}{2} P_k \chi_2^2 \quad (\text{Torrence \& Compo, 1998}) \quad (3.16)$$

Този израз позволява оценка на значимостта на спектралните пикове. На лявата страна на израза стои нормирания спектър на мощността на сигнала $x(t)$, състоящ от N стойности, (σ^2) σ^2 представлява дисперсията на сигналът, \hat{X}_k е оценка на DFT дискретен сигнал $x(t)$ състоящ от N стойности, а χ_2^2 е χ^2 -разпределението със степени на свобода 2.

3.4.4. Използван програмен език:

Python е широко използван за научни пресмятания и анализ на данни, тъй като предоставя богата система от библиотеки и инструменти.

В Python могат да се използват няколко основни библиотеки, които осигуряват както изчислителни възможности, така и визуализация на резултатите:

pandas: Тази библиотека е изключително подходяща за работа с таблични данни (DataFrames) и предоставя вградени функции за изчисляване на корелации между различни променливи. Изчисляване на корелацията, като Pearson, Kendall и Spearman.

numpy: Основна библиотека за числени изчисления между променливи.

matplotlib: За визуализиране на резултатите от корелационния анализ.

4. Източници на данни използвани в дисертацията

4.1. Характеристики на изследваните пещери

Проучването ни включва четири благоустроени пещери в България – Леденика, Съева дупка, Снежанка и Ухловица. Данните обхващат период от 52 години (1968 – 2020 г.). Пещерите са разположени на различна надморска височина и географска ширина. Пещерите са образувани във варовика преди близо 400 000 години.

В България има 4 основни карстови района – Мизийска, Стара планина, Тракийско-Средногорска планина – Странджа и Рила – Родопи (Korǵalev, 2002). Пещерите, които изследваме са разположени в определени по-малки региони, както следва:

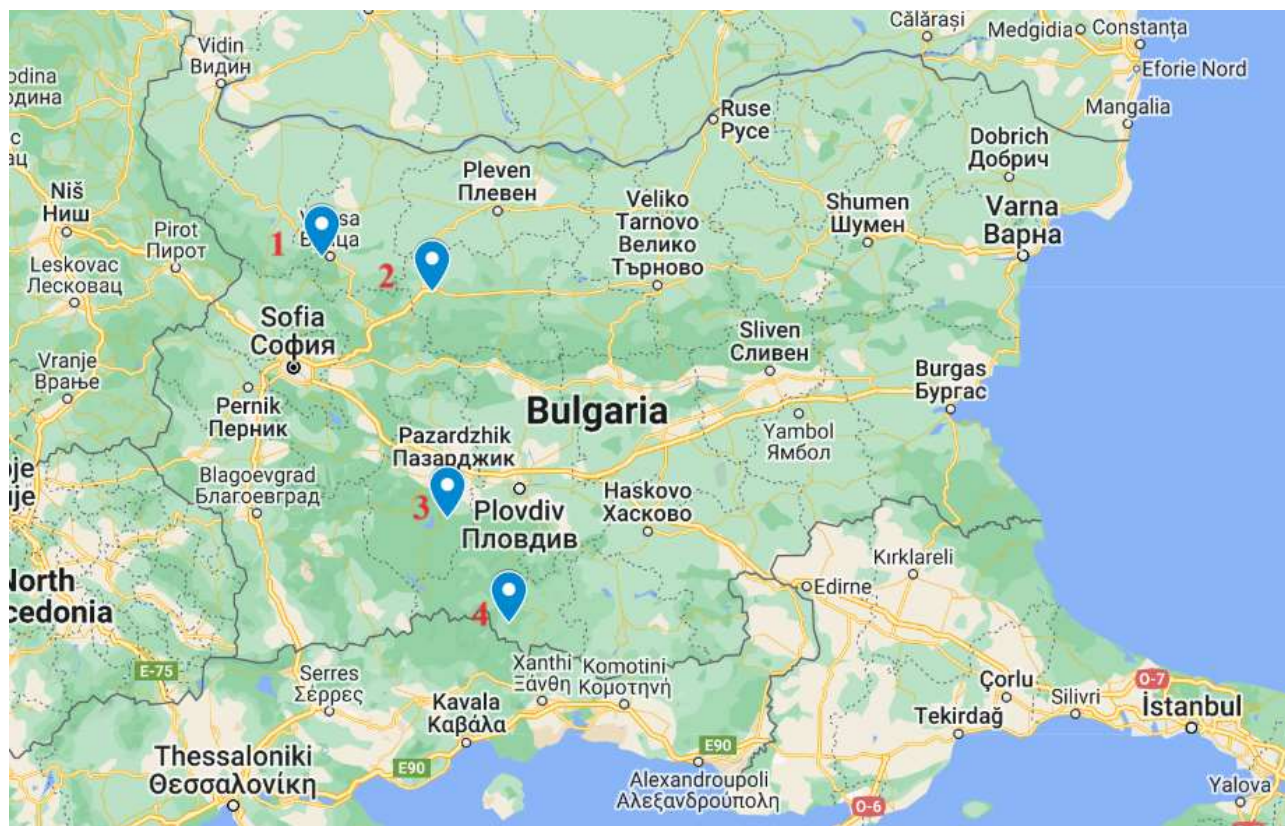
Съева дупка – намира се в Драганово-Бежанския карстов район, на 320 м надморска височина;

Снежанка – намира се в Пещерския карстов район, на 540 м надморска височина;

Леденика – намира се във Врачанския карстов район, на 1260 м надморска височина;

Ухловица – намира се в Смолянския карстов район, на 1480 м надморска височина.

На Фиг. 4.1.1 е представена детайлна карта на България, на която са маркирани четири точки, представляващи местоположенията на четирите пещери, които са обекти на изследванията, фокусирани върху температурните условия в Зоната на Константните Температури (ЗКТ). Маркираните точки са както следва: точка 1 - Пещера Леденика, точка 2 - Пещера Съева Дупка, точка 3 - Пещера Снежанка, точка 4 - Пещера Ухловица.



Фиг.4.1. Географско положение на пещерите, данни от които са използвани в дисертационния труд: 1 - Леденика, 2 – Съева Дупка, 3 - Снежанка, 4 – Ухловица.

В Табл. 4.1. е систематизирана информация за четирите изследвани пещери: Съева Дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица. Данните включват различни характеристики на тези пещери, подредени в колони.

Първата характеристика показва географските координати на пещерите. Следващата характеристика описва местоположението на всяка пещера по географски региони. Климатичните зони, в които се намират пещерите, също са включени. Надморската височина на пещерите е посочена в метри, а последната характеристика описва разстоянието в метри от входа на пещерата до мястото, където са разположени логерите.

Табл. 4.1.1. Характеристики на пещерите Съева Дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица

Характеристика	Съева Дупка	Леденика	Снежанка	Ухловица
Географски координати	43° 2' 51.4" N 24° 11' 16.44" E	43° 12' 16" N 23° 29' 28" E	42° 0' 15.13" N 24° 16' 43" E	41° 30' 50.98" N 24° 39' 36.22" E
Местоположение	Източна Стара Планина	Източна Стара Планина	Централни Родопи	Южни Родопи
Климатични зони	Умереноконтинентална	Умереноконтинентална	Континентална	Средиземноморска
Надморска височина (m)	520	830	1926	892
Отдалеченост на логерите от входа на пещерите (m)	55	165	75	92

4.2. Използвани данни

В проведените изследвания, освен температурните данни от зоната на константните температури (ЗКТ) в пещерите, са използвани също така и данни за различни параметри на слънчевата и геомагнитната активност. Допълнително, в анализа са включени и данни за приземната температура в района на пещерите за същия времеви интервал. Тези комплексни и многопластови данни позволяват задълбочен и всеобхватен анализ на взаимодействието между подземния микроклимат и външните климатични и геофизични фактори.

4.2.1. Температура в зоната на константните температури на изследваните пещери

Температурата на въздуха в зоната на константните температури (ЗКТ) се измерва ежедневно с точност до 0,1°C. Средномесечните и годишните стойности на температурите на въздуха са получени от осреднени ежедневни данни.

4.2.2. Приземна температура

Използвани са данни, отнасящи се до средната температура на повърхностния въздух (средногодишна стойност) за градовете Смолян, Враца и Ловеч за периода 1968-2020 година. Температурните данни са получени от <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/bulgaria/trends-variability-historical>.

Тези градове са избрани поради близкото си местоположение до изследваните пещери, и поради това, че базата данни разполага с непрекъснат ред от данни за периода 1968 до 2022,

който е залегнал в нашето изследване.

4.2.3. Характеристики на слънчевата активност

В настоящото изследване анализираме три основни показателя, свързани със слънчевата активност: броя на слънчевите петна, индекса F10.7 и общото слънчево излъчване.

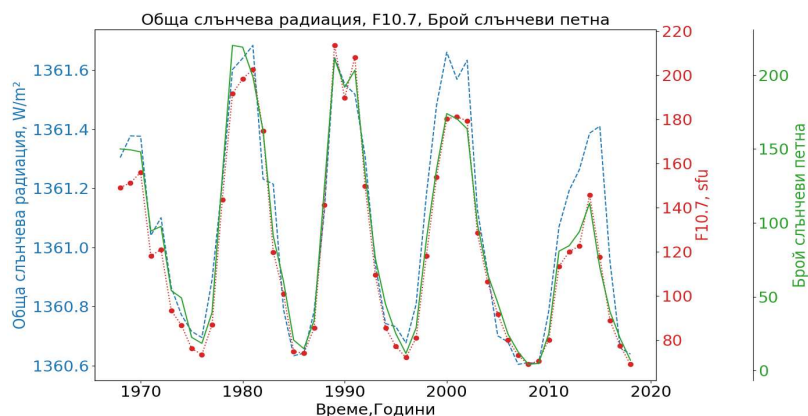
Информацията относно броя на слънчевите петна, S_n е получена от Международната служба за слънчева активност (SILSO) на сайта: <https://www.sidc.be/SILSO>.

Освен S_n се използват и стойностите на **индекса F10.7**, с които разполага Лабораторията за атмосферни и космически изследвания на Университета в Колорадо, и са достъпни чрез техния уебсайт https://lasp.colorado.edu/lisird/data/noaa_radio_flux. В това научно изследване са включени средногодишни стойности на F10.7 за периода от 1968 до 2018 година.

Третата използвана характеристика на слънчевата активност е **пълна слънчева радиация (Total Solar Irradiance, TSI)**. Данни TSI са достъпни на уебсайта на Националния център за екологична информация (NCEI) на NOAA. Използваме средногодишните стойности за периода от 1968 до 2022 година на следния адрес: <https://www.ncei.noaa.gov/data/total-solar-irradiance/access/yearly/>.

На Фиг. 4.2. е показан ходът на трите използвани слънчеви параметри: TSI (пълната слънчева радиация), F10.7 (потокът на радиация при дължина на вълната 10.7 см) и броят на слънчевите петна във времето през изследвания период.

- Синята прекъсната линия представя стойностите на TSI, измерени в ватове на квадратен метър (W/m^2).
- Червените точки показват стойностите на F10.7, измерени в слънчеви потокови единици (sfu).
- Зелената линия показва броя на слънчевите петна.



Фиг. 4.2. Циклични вариации на TSI, F10.7, S_n

Характеристики на геомагнитната активност

A_p индексът е важен за изучаването на космическото време и неговото влияние върху земната атмосфера и технологии, включително комуникационни системи и навигационни мрежи.

В настоящото изследване, използваме средногодишната стойност на A_p , за периода 1968-2020 година, изтеглени от <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/data-products-services/geomagnetic-kp-index>.

5. Резултати

В тази глава ще изложим всички анализи на данни, обработени по време на изследването. Целта е да се предостави ясна и детайлна картина на основните резултати, като се акцентира върху ключовите открития, които отговарят на изследователските въпроси и хипотези, формулирани в предходните глави.

Ще бъдат разгледани различните аспекти на изследваните явления, като се обърне внимание на значимостта на резултатите за теоретичната рамка и тяхното приложение в практиката. Главата завършва с обсъждане на резултатите в контекста на съществуващата научна литература и подчертава новите приноси, които те носят за съответната научна област.

5.1. Изследване на връзката на температурата в зоната на константна температура на пещерите Съева Дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица и слънчевите параметри.

В центъра на изследването се намират температурните вариации в зоната на константна температура (ЗКТ) и връзката с индексите, описващи слънчевата активност. В таблица 5.1.1 са представени коефициентите на корелация на Пирсън между температурата в ЗКТ в четирите пещери: Съева Дупка, Леденика Снежанка и Ухловица и мерки на слънчевата активност: S_n , TSI, F10.7 и A_p индекса. Първата колона съдържа комбинациите от променливи, а втората колона показва стойностите на корелационните коефициенти.

Таблица 5.1.1 Коефициенти на корелация на Пирсън между слънчевите параметри и температурите в ЗКТ в пещерите Ухловица, Снежанка, Леденика и Съева дупка

Променлива	r	Променлива	r	Променлива	r	Променлива	r
$S_n/T_{\text{Ухловица}}$	0,744	$S_n/T_{\text{Съевадупка}}$	-0,071	$S_n/T_{\text{Снежанка}}$	0,564	$S_n/T_{\text{леденика}}$	0,691
$TSI/T_{\text{ухловица}}$	0,694	$F10.7/T_{\text{съевадупка}}$	-0,174	$TSI/T_{\text{снежанка}}$	0,526	$TSI/T_{\text{леденика}}$	0,679
$F10.7/T_{\text{ухловица}}$	0,719	$TSI/T_{\text{съевадупка}}$	-0,173	$F10.7/T_{\text{снежанка}}$	0,543	$F10.7/T_{\text{леденика}}$	0,725
$A_p/T_{\text{ухловица}}$	0,274	$A_p/T_{\text{съевадупка}}$	0,453	$A_p/T_{\text{снежанка}}$	0,363	$A_p/T_{\text{леденика}}$	0,269

В данните се наблюдават различни нива на корелация между слънчевата активност и измерените температури в ЗКТ. Коефициентът на корелация от 0.744 между S_n и температурата в ЗКТ в пещерата Ухловица ($T_{\text{Ухловица}}$) показва силна положителна линейна връзка, което предполага, че повишаването на слънчевата активност води до значителна вариация на температурата в ЗКТ. Подобно, силна положителна връзка се наблюдава и между S_n и температурата в пещерата Леденика ($T_{\text{Леденика}}$) с коефициент 0.691.

От друга страна, корелацията между S_n и температурата в ЗКТ на пещера Съева дупка ($T_{\text{Съевадупка}}$) е много слаба и отрицателна (-0.071), което сочи за липса на линейна връзка между тези две променливи. Това може да се дължи на специфични локални климатични и географски условия.

Докато корелационните коефициенти между температурата в ЗКТ и S_n , TSI и F10.7 са много подобни, тези с A_p индекса са много по-ниски и са по-малки от 0.5.

Наличието на силни положителни корелации в някои от изследваните пещери и липсата на такива в други подчертава сложността на климатичните системи и влиянието на различни фактори върху температурните промени. Локални климатични условия, като вариации във влажността, както и образуването на лед в пещерата могат значително да модифицират температурните режими. Поради характерната структура на карстовите масиви, се очаква забавено въздействие на температурните промени, предизвикани от слънчевата активност,

именно за това изследваме и връзката с отместване във времето. Тъй като корелационният коефициент е най-висок за S_n , избираме този параметър на слънчевата активност за допълнителните изследвания с времево отместване. Резултатите от тези изследвания са представени в Таблица 5.1.2. Най-силните корелации за всяка пещера са посочени с червени стрелки.

Най-високата положителна корелация е получена при закъснение от три години за $T_{\text{Съвадулка}}$ ($r = 0.808$) с t -статистика 9.794 и доверителен интервал от 0.642 до 0.974. За $T_{\text{Ухловица}}$, най-силната връзка е без закъснение ($r = 0.744$) с доверителен интервал от 0.556 до 0.932 и t -статистика 7.952. При $T_{\text{Снежанка}}$, най-високата корелация е при закъснение от една година ($r = 0.763$) с доверителен интервал от 0.581 до 0.945 и t -статистика 6.576. За $T_{\text{Леденика}}$, най-силната връзка е без закъснение ($r = 0.691$) с доверителен интервал от 0.488 до 0.894 и t -статистика 6.827. Тези резултати подчертават, че слънчевата активност оказва значително влияние върху температурите на пещерите, като това влияние варира в зависимост от периода на закъснение. В краткосрочен план връзката е положителна и значителна, но с увеличаване на закъснението корелацията намалява и дори става отрицателна в някои случаи. Тук получените резултати относно корелация между температурата в пещерите и индексите на слънчевата активност S_n и на геомагнитната активност A_p до голяма степен потвърждават резултатите, получени по-рано от Stoev и Stoeva (2005), и Stoeva (2019), на базата на изследвания на по-къси времеви редове от 1968 до 2003 относно корелационни връзки и фази. Проведеният анализ на Фурие на пещерната температура Stoeva et al (2006), открива период от около 10 години и един по-слаб по интензивност период от пет години.

Табл.5.1.2. Коефициент на Пирсън на брой слънчеви петна и температурата в четирите пещери, отместен във времето до четири години, стандартна грешка, стойността на t -статистика, доверителен интервал.





	период	r	S_r	t_statistic	Дов. Инт. Долна граница	Дов. Инт. горна граница
$S_n/T_{\text{Съвадулка}}$	Без отм.	-0,071	0,14	-0,508	-0,352	0,21
	1 год отм.	0,4	0,128	3,117	0,142	0,658
	2 год отм.	0,747	0,093	8,024	0,56	0,934
	 3 год отм.	0,808	0,083	9,794	0,642	0,974
	4 год отм.	0,765	0,09	8,483	0,584	0,946
$S_n/T_{\text{Ухловица}}$	 Без отм.	0,744	0,094	7,952	0,556	0,932
	1 год отм.	0,621	0,11	5,658	0,4	0,842
	2 год отм.	0,318	0,133	2,395	0,051	0,585
	3 год отм.	-0,033	0,14	-0,236	-0,314	0,248
	4 год отм.	-0,339	0,132	-2,573	-0,604	-0,074
$S_n/T_{\text{Снежанка}}$	Без отм.	0,564	0,116	4,878	0,332	0,796
	 1 год отм.	0,763	0,091	8,43	0,581	0,945
	2 год отм.	0,694	0,101	6,884	0,491	0,897
	3 год отм.	0,385	0,129	2,979	0,125	0,645
	4 год отм.	-0,032	0,14	-0,229	-0,313	0,249
$S_n/T_{\text{Леденика}}$	 Без отм.	0,691	0,101	6,827	0,488	0,894
	1 год отм.	0,625	0,109	5,718	0,405	0,845
	2 год отм.	0,368	0,13	2,826	0,106	0,63
	3 год отм.	-0,018	0,14	-0,129	-0,299	0,263
	4 год отм.	-0,383	0,129	-2,961	-0,643	-0,123

Табл.5.1.3. Коефициент на Пирсън на геомагнитната активност и температурата в четирите пещери отместен във времето до четири години, стандартна грешка, стойността на t-статистика, доверителен интервал.





	период	r	Sr	t_statistic	Дов. Инт. Долна граница	Дов. Инт. Горна граница	
B	А _p /Т _{Съвадупка}	Без отм.	0,453	0,125	3,629	0,202	0,704
	 1 год отм.	0,567	0,115	4,916	0,335	0,799	
	2 год отм.	0,498	0,121	4,101	0,254	0,742	
	3 год отм.	0,334	0,132	2,531	0,069	0,599	
	4 год отм.	0,137	0,139	0,988	-0,142	0,416	
	А _p /Т _{Ухл}	Без отм.	0,274	0,135	2,035	0,003	0,545
	 1 год отм.	0,131	0,139	0,944	-0,148	0,41	
	2 год отм.	-0,039	0,14	-0,279	-0,32	0,242	
	3 год отм.	-0,149	0,138	-1,076	-0,427	0,129	
	4 год отм.	-0,176	0,138	-1,277	-0,453	0,101	
	А _p /Т _{Снежанка}	Без отм.	0,363	0,13	2,782	0,101	0,625
	 1 год отм.	0,246	0,136	1,812	-0,027	0,519	
	2 год отм.	0,095	0,139	0,682	-0,185	0,375	
	3 год отм.	-0,076	0,14	-0,544	-0,357	0,205	
	4 год отм.	-0,246	0,136	-1,812	-0,519	0,027	
	А _p /Т _{Леденика}	Без отм.	0,269	0,135	1,995	-0,002	0,54
 1 год отм.	0,123	0,139	0,885	-0,156	0,402		
2 год отм.	-0,047	0,14	-0,336	-0,328	0,234		
3 год отм.	-0,192	0,137	-1,397	-0,468	0,084		
4 год отм.	-0,278	0,135	-2,067	-0,548	-0,008		

таблица 5.1.3 са представени коефициентите на корелация на Пирсън между температурата в ЗКТ в четирите пещери: Съва Дупка, Леденика Снежанка и Ухловица и индекса на геомагнитната активност А_p. С червени стрелки е посочена най-силната корелация за всяка пещера.

Геомагнитната активност показва умерени до слаби корелации с температурите, което подчертава сложността на климатичните системи. Най-високи корелационни коефициенти са получени за връзката между А_p и Т_{Съвадупка}. Най-високата корелация е наблюдавана при закъснение от една година ($r = 0.567$), което посочва силна положителна връзка между геомагнитната активност и температурите в Т_{Съвадупка}. Тази стойност е съпътствана от висока t-статистика (4.916) и доверителен интервал от 0.335 до 0.799, което потвърждава значимостта на връзката.

При връзката между А_p и Т_{Ухловица} най-високата корелация е без закъснение, с коефициент $r = 0.274$, което показва умерена положителна връзка между геомагнитната активност и температурите в Т_{Ухловица}. Въпреки че корелацията не е толкова силна, тя все пак е значима с доверителен интервал от 0.003 до 0.545, макар и на границата на значимостта.

При пещерата Снежанка най-високата корелация е наблюдавана без закъснение, с $r = 0.363$, което показва умерена положителна връзка между геомагнитната активност и температурите в Т_{Снежанка}. Тази стойност има висока t-статистика (2.782) и доверителен интервал от 0.101 до 0.625.

За Леденика най-високата корелация се получава без закъснение, с коефициент $r = 0.269$, което съответства на умерена положителна връзка между геомагнитната активност и

температурите в $T_{\text{Леденика}}$. Тази стойност е съпътствана от доверителен интервал от -0.002 до 0.540, което показва, че връзката е на границата на значимостта.

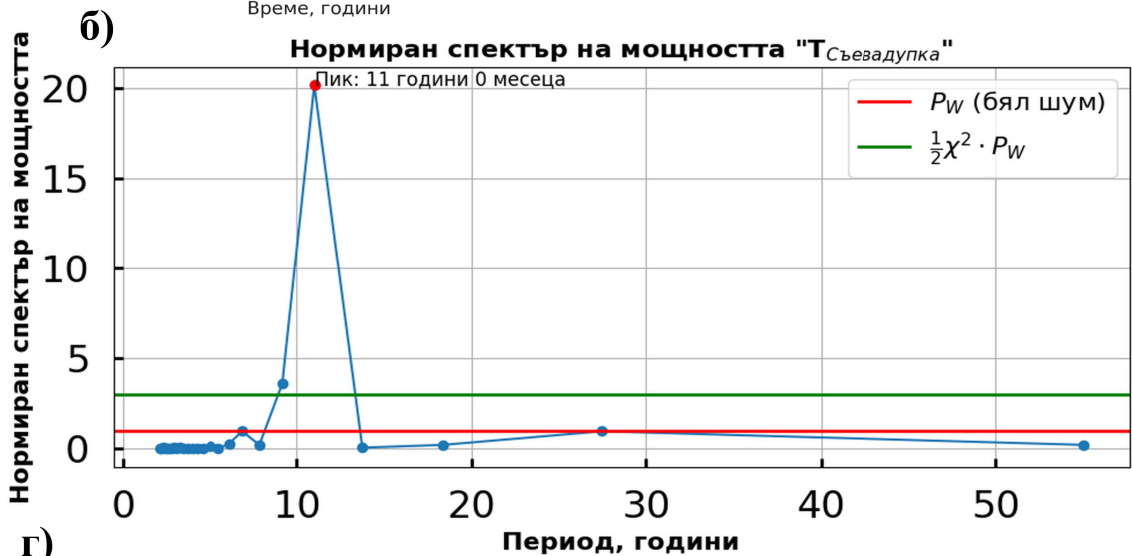
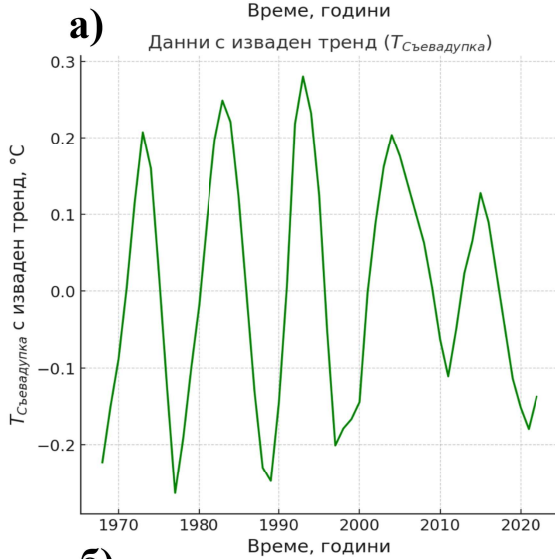
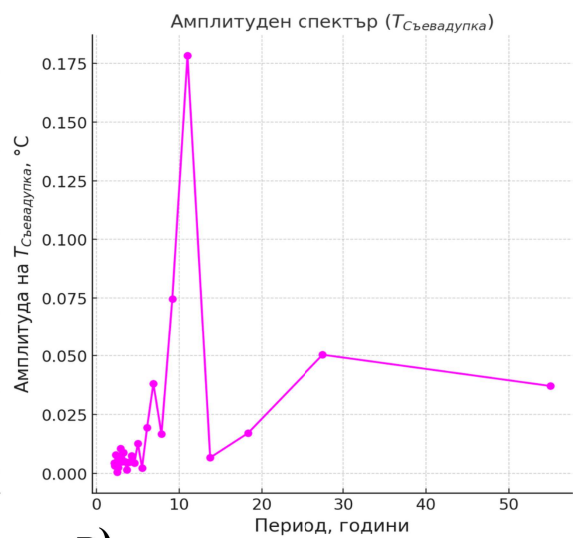
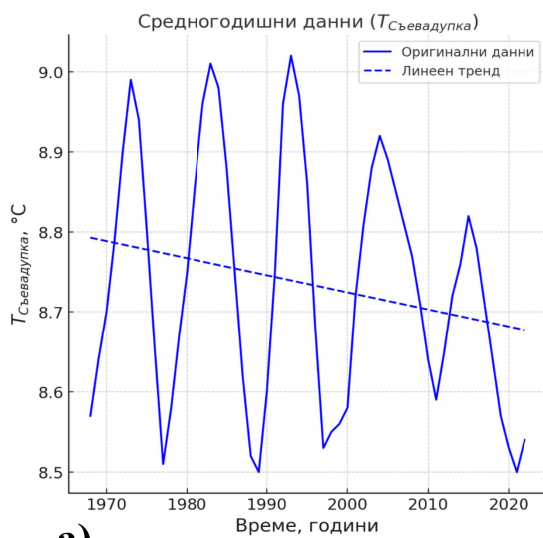
На Фиг.5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 и 5.1.4 са показани резултати от изследването на хода на температурата в изследваните пещери. Първата графика във Фиг.5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 и 5.1.4 показва оригиналните данни за средногодишните температури съответно за Съева Дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица за изследвания период (1968-2022) (в синьо) и линейния тренд (синя пунктирана линия). Трендовете на температурите в ЗКТ за изследваните тук пещери освен за Леденика за изследвания интервал от време са отрицателни, с наклон около 0.1°C до 0.2 °C за пещерите Ухловица, Снежанка и Съевата Дупка, а за пещерата Леденика наклонът е около 0 °C.

На графики б) със зелени линии са представени данните с изваден линеен тренд. Вижда се, че трендът е изчистен.

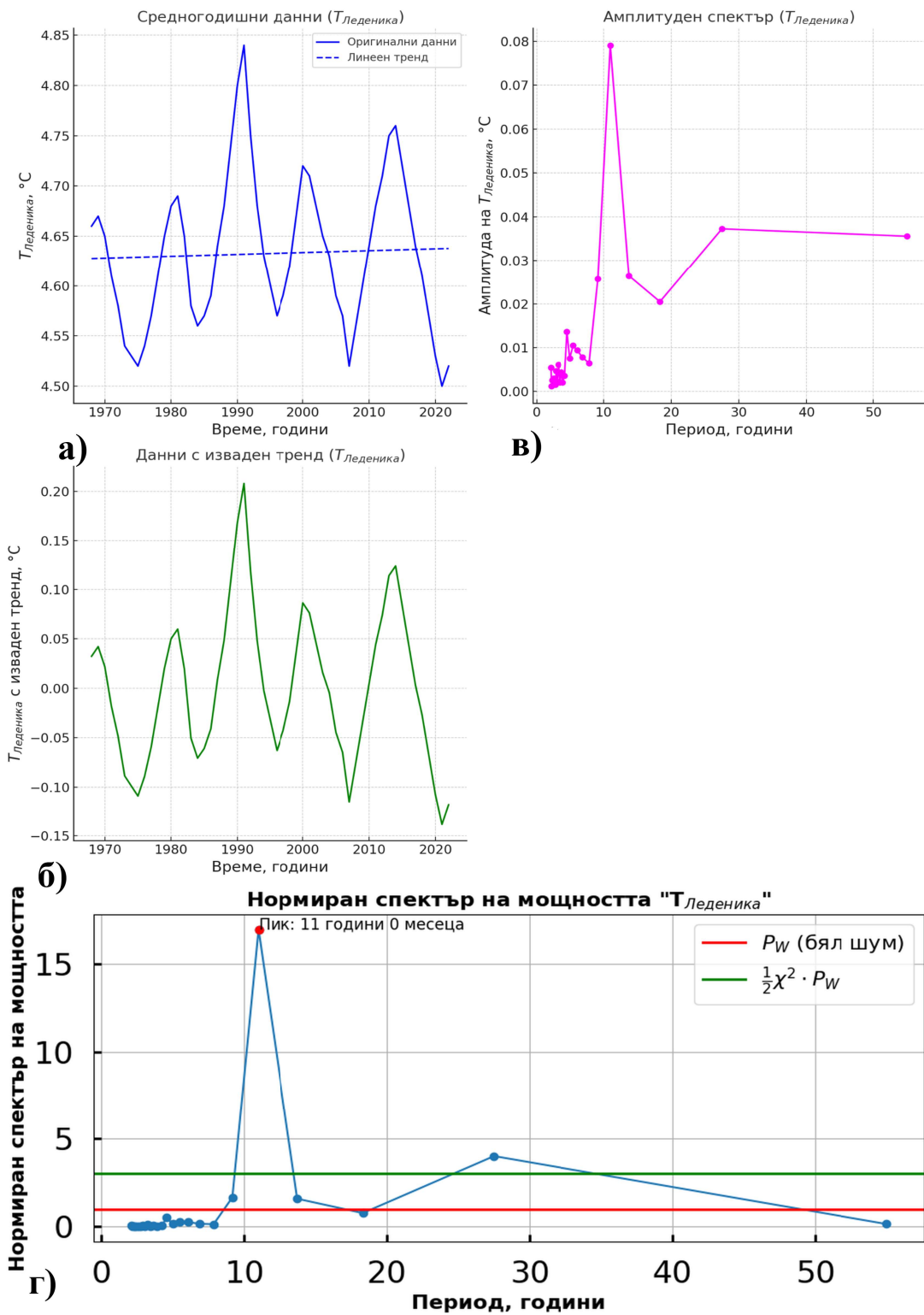
На графиките в) (в лилаво) са представени амплитудите на температурните вариации в зависимост от периода. Спектрите показват –една голяма амплитуда с период 11 години и няколко по-малки амплитуди. Графиките г) показват изчислените нормирани спектри на мощността (по формула 36 в глава 3 „Методика на изследването“) за различни периоди. Червената линия показва спектъра на мощността на бял шум, а зелената линия – спектъра на мощността на бял шум, умножен с критичната стойност на $\chi^2/2$ за 2 степени на свобода и значимост 0.05.

Нормираните спектри на мощността на температурните редове, измервани в ЗКТ, разкриват значителни циклични колебания с период около 11 години, което съответства на 11-годишния слънчев цикъл. Най-голямата амплитуда при 11 години е установена за пещерата Снежанка, около 0.38°C, следвана от амплитудата на колебанията в пещерата Ухловица - приблизително 0.29°C и почти 0.18°C е намерената амплитуда, съответстваща на 11 годишния слънчев цикъл в Съевата Дупка. Тези амплитуди от порядъка от 0.1° до 0.4° съответстват на среден температурен отговор на 11 годишен цикъл на приземната температура, така както се очаква (виж т. 2.2.) Най-малка, но статистически значима, е установената амплитуда в ледената пещера Леденика - 0.08°C. За определяне на по-дълги цикли, например 22 годишен цикъл, времеия ред, с който разполагаме, не е достатъчно дълъг. Трябва да се отбележи, че в приземните температури не е установено влияние на 11 годишен цикъл. Всички линейни трендове на температури в пещерите освен за Леденика са отрицателни. Stoeva & Stoev (2018), виждат причината за намаляване на температурите на пещерите във факта, че те са отворени за посетители, с големи отвори към входовете им. Тук забелязваме, че трендовете могат да се дължат вероятно и на самата структура на Sn. При по-рано проведения анализ на Фурие на пещерни температури от Stoeva et al. (2006) са открити периоди от около 10 години, който беше идентифициран с 11-годишния период на слънчевия цикъл и един, по-слаб по интензивност период, от пет години. Тук се откриват само периоди, съвпадащи с 11-годишния Слънчев цикъл, всички други по-къси хармоници са статистически незначими.

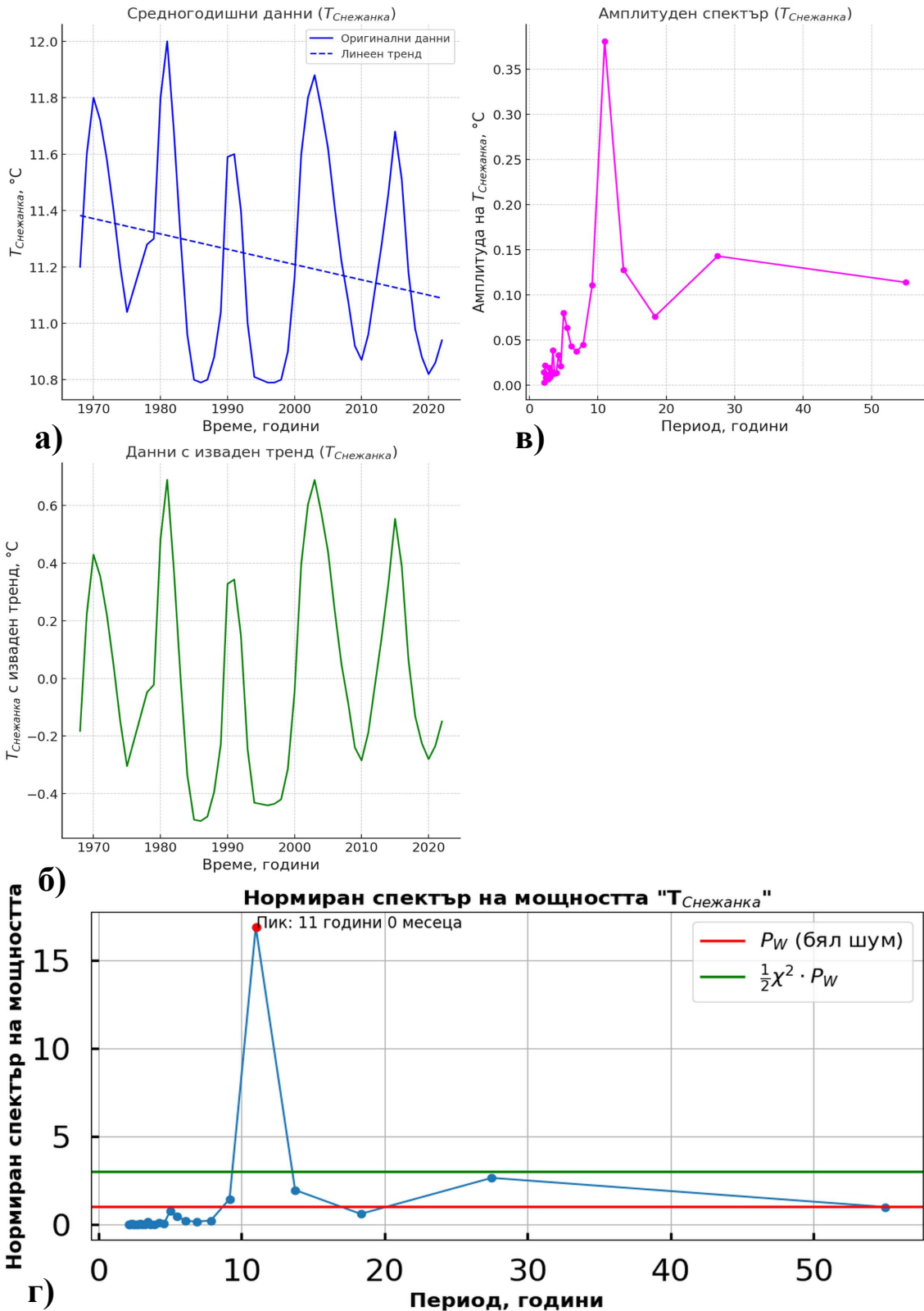
На Фиг. 5.1.5, 5.1.6, 5.1.7 и 5.1.8 разглеждаме температурата в ЗКТ за пещерите Леденика, Снежанка, Ухловица и Съева дупка, и слънчевите параметри TSI, F10.7, S_n , A_p . Във всички пещери се наблюдава сходен цикличен характер между хода на температурата и този на TSI, F10.7, S_n , и A_p . Най-голяма разлика между положенията на пиковите и минимумите на температурата в пещерите и слънчевите параметри се наблюдава за Съева дупка, което съответства на получените резултати при изследването на корелациите с времево отместване.



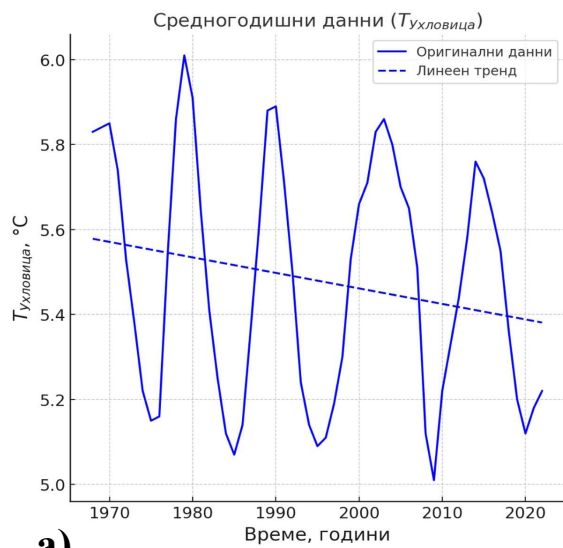
Фиг.5.1.1 Оригинални данни за температурата в пещера Съева дупка а) с линеен тренд; б) с изваден линеен тренд; в) амплитуден спектър на Фурие и г) нормиран спектър на мощността.



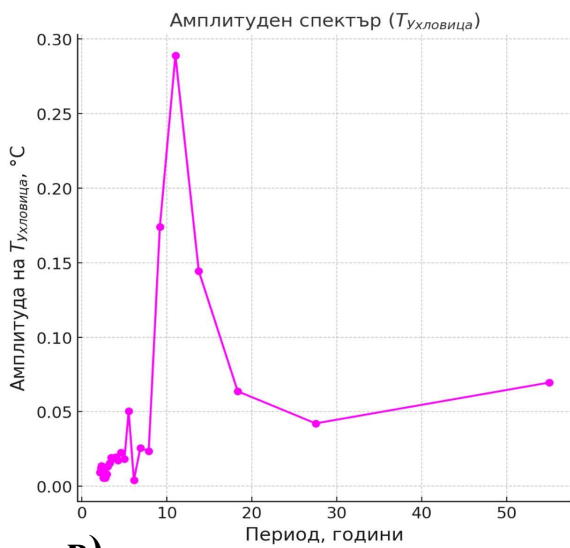
Фиг.5.1.2 Оригинални данни за температурата в пещера Леденика а) с линеен тренд; б) с изваден линеен тренд; в) амплитуден спектър на Фурие и г) нормиран спектър на мощността.



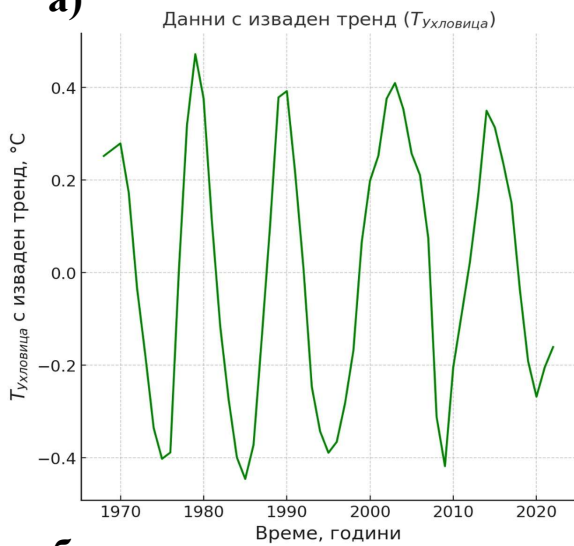
Фиг.5.1.3.Оригинални данни за температурата в пещера Снежанка а) с линеен тренд; б) с изваден линеен тренд; в) амплитуден спектър на Фурие и (г) нормиран спектър на мощността.



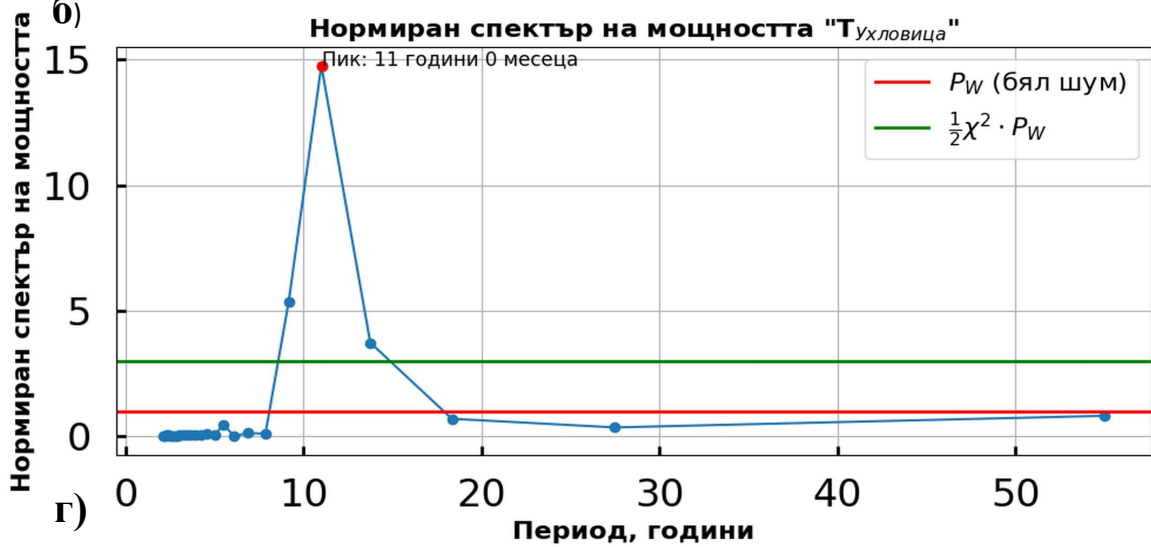
а)



в)

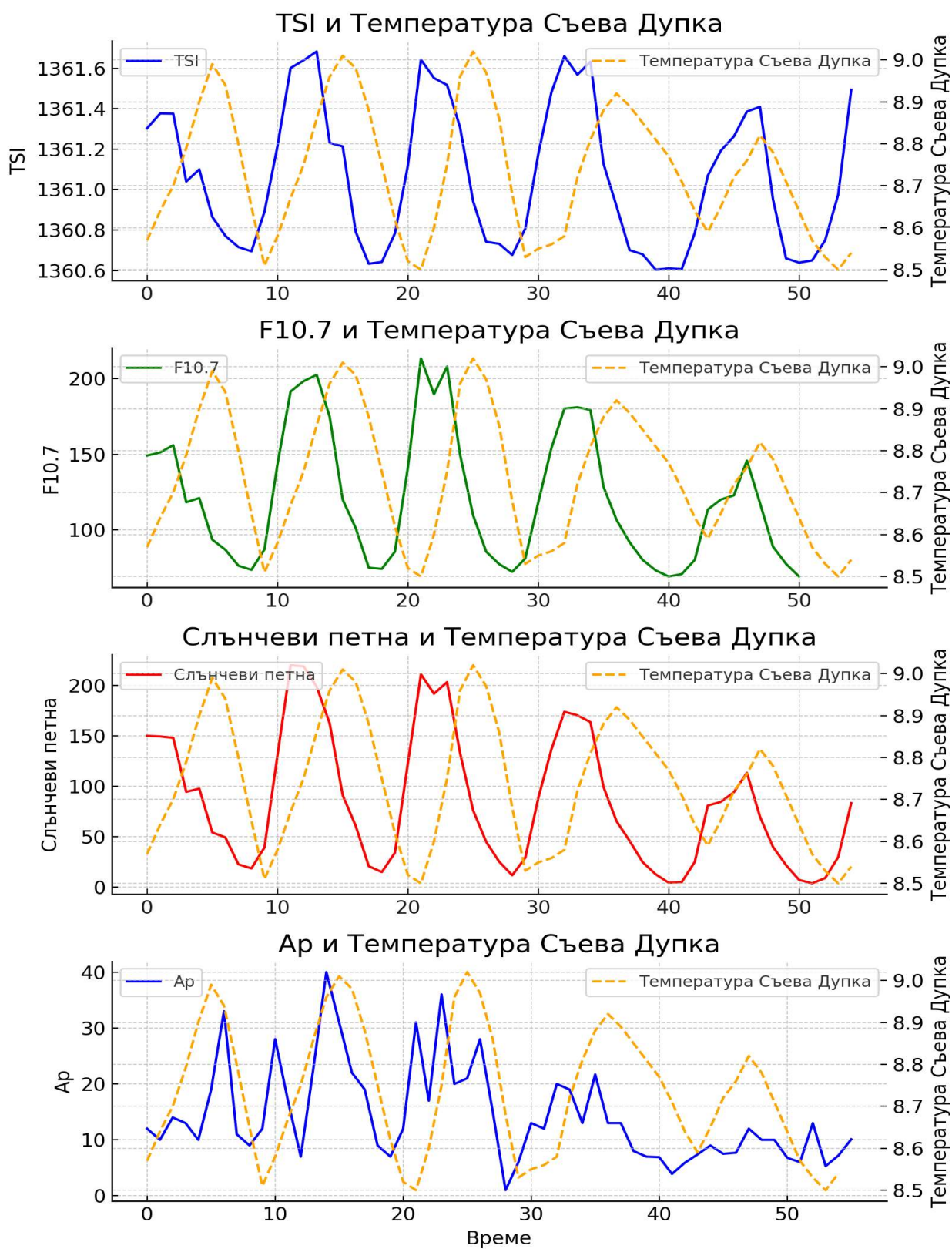


б)

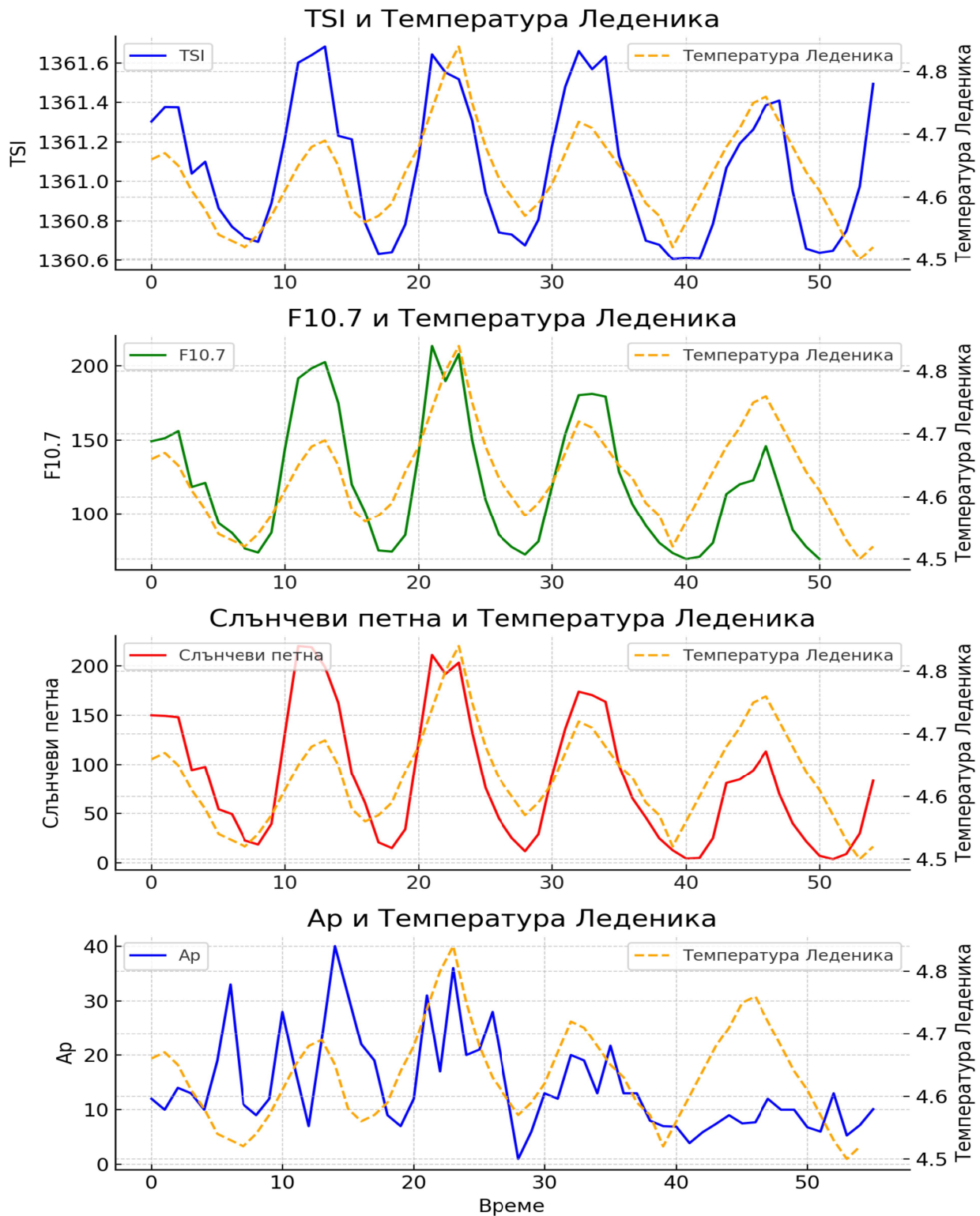


г)

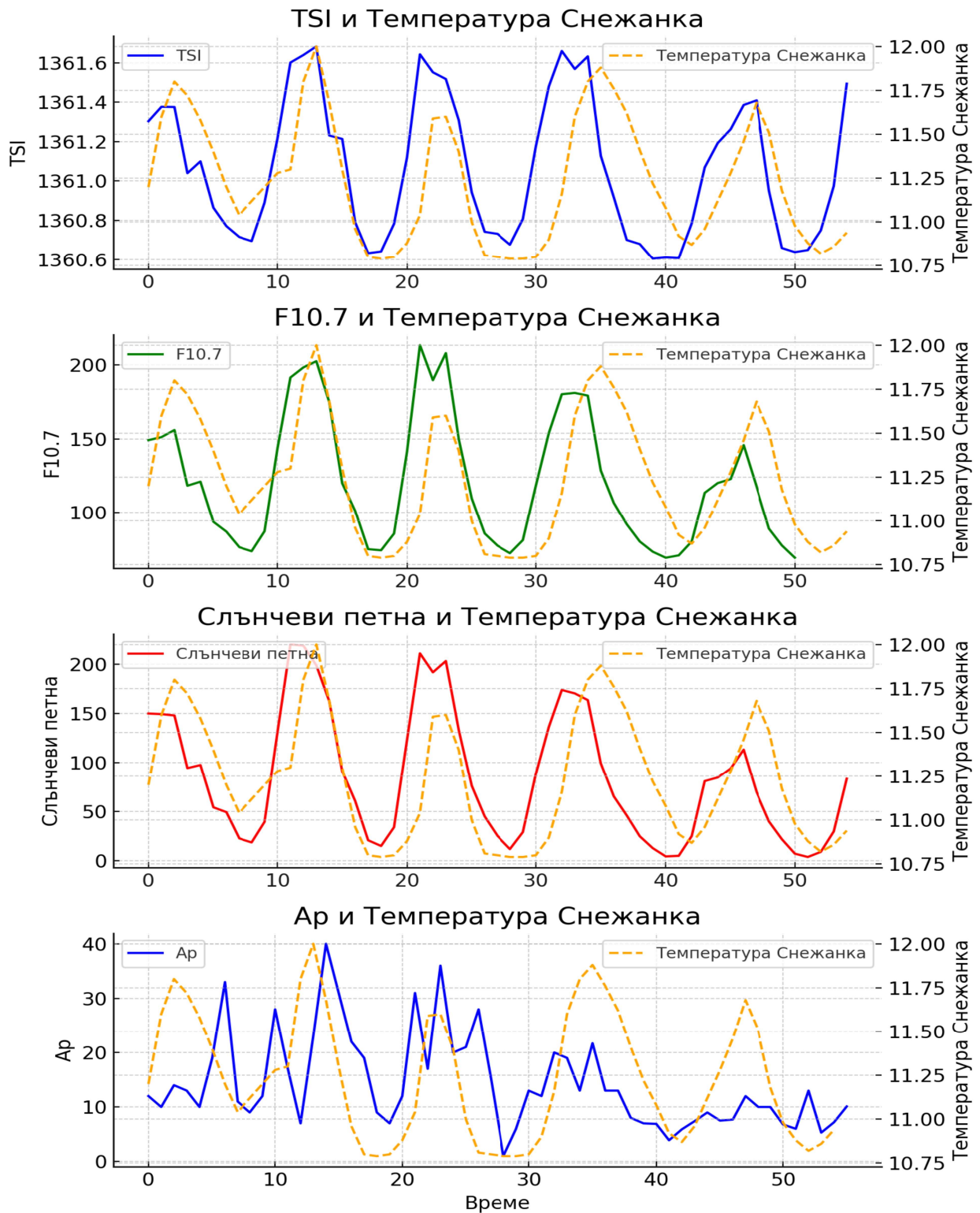
5.1.4. Оригинални данни за температурата в пещера Ухловица а) с линеен тренд; б) с изваден линеен тренд; в) амплитуден спектър на Фурие и г) нормиран спектър



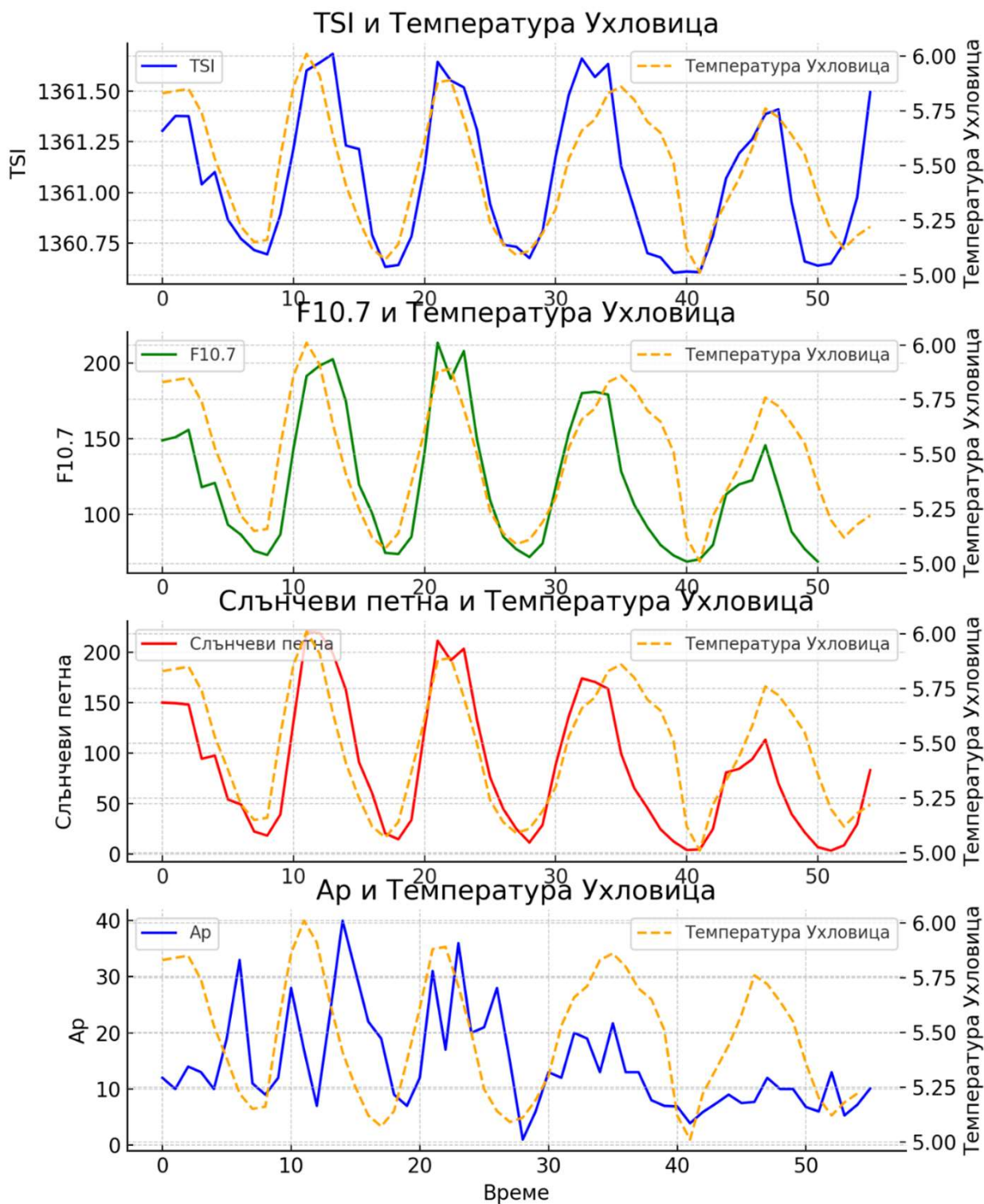
Фиг. 5.1.5. Сравнение на слънчевата активност (TSI, F10.7, слънчеви петна и A_p) и температурата в пещерата Съева Дупка, за периода 1968-2022.



Фиг. 5.1.6. Сравнение на слънчевата активност (TSI, F10.7, слънчеви петна и A_p) и температурата в пещерата Леденика, за периода 1968-2022.



Фиг. 5.1.7 Сравнение на слънчевата активност (TSI, F10.7, слънчеви петна и A_p) и температурата в пещерата Снежанка, за периода 1968-2022.



Фиг. 5.1.8 Сравнение на слънчевата активност (TSI, F10.7, слънчеви петна и A_p) и температурата в пещерата Ухловица, за периода 1968-2022.

За останалите пещери пиковите и спадовете в TSI съвпадат с някои от пиковите на температурите, макар че температурните криви показват известно закъснение. Тази забавена реакция на температурата може да се обясни с топлинната инерция на карстовите масиви, които абсорбират и бавно освобождават топлина. Радиоизлъчването на F10.7 cm също

показва добри корелации с температурите в пещерите. При слънчевите петна и температурите в пещерите се наблюдава, че в някои случаи има несъвпадение на пиковите – температурните върхове понякога се случват след период на максимален брой слънчеви петна, което е вероятно поради натрупването и бавното освобождаване на топлина в пещерите.

Несъвпаденията са най-видими при графиките на A_p индекса, който измерва геомагнитната активност. Въпреки че има цикличност в A_p индекса, тя не е толкова ясно корелирана с температурните колебания. Това показва, че геомагнитната активност има по-слаб или по-забавен ефект върху температурата в пещерите, в сравнение с другите слънчеви параметри.

Въпреки че температурите също показват цикличност, тяхната амплитуда е по-приглушена и изглежда следва слънчевите параметри известно закъснение. Тази забавена реакция е типична за подземните среди, където температурните колебания се разпространяват бавно и не винаги са в синхрон с промените в атмосферата.

5.2. Изследване на връзката на приземната температура в градовете Враца, Ловеч и Смолян и слънчевите параметри

Таблица 5.2. представя коефициентите на корелация на Пирсън между приземните температури в три различни населени места: Враца, Смолян и Ловеч, и използваните при изследването параметри на слънчевата активност. Първата колона съдържа комбинациите от променливи, а втората колона показва съответните стойности на корелационните коефициенти.

Коефициент на корелация от +1 показва перфектна положителна връзка между две променливи, което означава, че увеличаването на едната променлива е свързано с пропорционално увеличаване на другата променлива. Обратно, коефициентът от -1 индикира перфектна отрицателна връзка, което означава, че увеличаването на едната променлива води до пропорционално намаляване на другата. Анализът на коефициентите на корелация в настоящото изследване обаче показва, че няма значими линейни връзки между слънчевата активност и приземните температури в изследваните населени места.

Всички стойности на корелационните коефициенти са близки до нулата, което индикира слаба или несъществуваща връзка между променливите. Възможно е други фактори, като локални климатични условия, географски особености, и антропогенни влияния, да играят по-съществена роля в определянето на температурите в тези райони.

Табл.5.2. Коефициенти на корелация на Пирсън между приземните температури и параметрите на слънчевата активност.

Променливи	(r)	Променливи	(r)
$S_n/T_{\text{Смолян}}$	-0,08	$F10.7/T_{\text{Смолян}}$	-0,005
$S_n/T_{\text{Враца}}$	-0,188	$F10.7/T_{\text{Враца}}$	-0,07
$S_n/T_{\text{Ловеч}}$	-0,197	$F10.7/T_{\text{Ловеч}}$	-0,085
$TSI/T_{\text{Смолян}}$	0,085	$A_p/T_{\text{Смолян}}$	-0,204
$TSI/T_{\text{Враца}}$	-0,034	$A_p/T_{\text{Враца}}$	-0,378
$TSI/T_{\text{Ловеч}}$	-0,03	$A_p/T_{\text{Ловеч}}$	-0,446

На фиг.5.2.1, фиг.5.2.2. и фиг.5.2.3. са представени данни за средногодишни температури с помощта на различни методи за определяне и изваждане на тренд и спектрален анализ. Методите на обработка, резултатите и анализа им са представени в (Raykova, 2022; Raykova, 2024a Raykova, 2024b)

Първата графика (а) във Фиг. 5.2.1, 5.2.2 и 5.2.3 показва оригиналните данни за средногодишните температури съответно за Враца, Ловеч и Смолян за изследвания период (1968-2020) (в синьо) и линейния тренд (синя пунктирна линия). От началото на изследвания период до около средата на 80те години и на трите места температура има лек отрицателен тренд или трендът остава близко до нулата, а след това се забелязва общо нарастване на температурите с течение на времето с около 0.05°C за година, съответстващо на ускореното затопляне, наблюдавано на Балканския полуостров и в много други региони на Европа (Peneva et al., 2023) . Т.е. и трите температурни редове вероятно се характеризират с точка на структурна промяна около 1985 г. (Структурни промени в температурни редове са изследвани например от Werner, 2015.) Точка на структурна промяна около 1985 г. е причината квадратичният тренд да описва тренда по-добре, отколкото линейния тренд, което е очевидно чрез сравнение на съответните фигури 5.2.1.а, 5.2.2.а и 5.2.3а с 5.2.1.б, 5.2.2.б и 5.2.3.б

На графики б) със зелени пунктирани линии са представени квадратичните трендове. Данните след изваждане на квадратичните трендове, маркирани с оранжеви линии (графики в), показват колебания около нулата. На графиките г) (в лилаво) са представени амплитудите на температурните вариации в зависимост от периода. Спектрите показват множество от амплитуди с периоди по-малки от десет години. Най-големите амплитуди се наблюдават при периоди около 7.5 години. Графиките д) показват изчислените нормирани спектри на мощността (по формула 36 в глава 3 методика на изследването) на различни периоди. Червената линия показва спектъра на мощността на бял шум, а зелената линия – спектъра на мощността на бял шум, умножен с критичната стойност на $\chi^2/2$ за 2 степени на свобода и значимост 0.05. Оказва се, че от всички малки спектрални пикове е значим само пикът със среден период за изследвания времеви интервал 6.6 години за Враца и Ловеч и 7.6 години за Смолян, който вероятно е свързан със Северната Атлантическа Осцилация. Северната Атлантическа осцилация (NAO) е климатичен феномен, свързан с колебанията в атмосферното налягане между Исландския минимум и Азорския максимум. Тези промени в налягането влияят на метеорологичните условия в Северното полукълбо, особено в Европа, Северна Америка и Северния Атлантик. NAO има две основни фази:

Положителна фаза: Характеризира се със засилена разлика в налягането между Исландия и Азорските острови. Това води до по-силни западни ветрове и по-топли и влажни зими в Западна Европа, но по-студени и по-сухи условия в Гренландия и Източна Канада.

Отрицателна фаза: Разликата в налягането е по-слаба, което води до по-слаби западни ветрове и по-студени зими в Европа и по-влажни условия в Средиземноморието.

Този климатичен индекс има значителен ефект върху времето и климата, като промени във валежите и температурите в различни региони. Влиянието на Северната Атлантическа Осцилация върху климата на България е добре известно и е широко изследвано, особено от българските метеоролози (Nikolova & Noda, 2004).

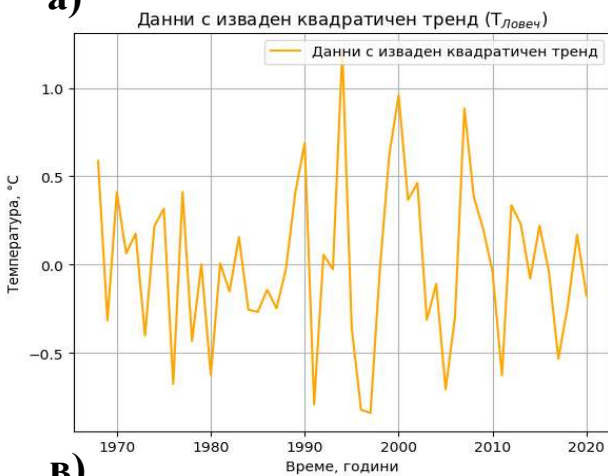
За влиянието на NAO върху приземните температури близо до пещерите говори и намаляването на амплитудите на температурите от север (Враца) с наблюдавана средна амплитуда около 0.3°C , към изток (Ловеч) с наблюдавана средна амплитуда приблизително 0.25°C и от там към юг (Смолян) с наблюдавана средна амплитуда около 0.24°C .



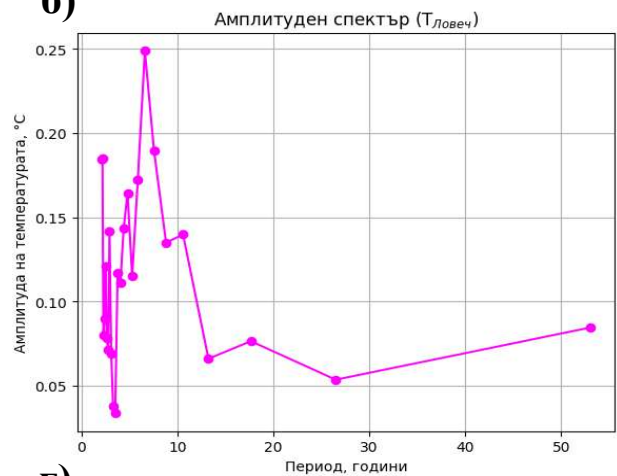
а)



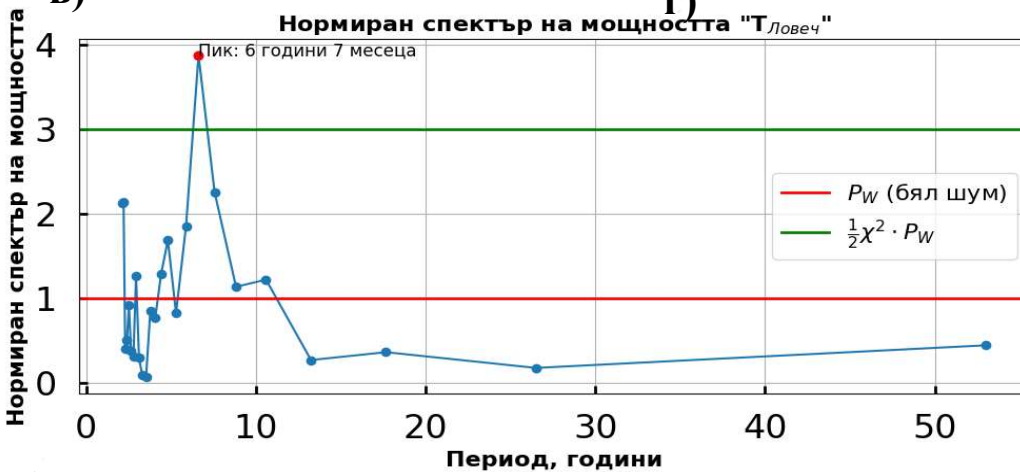
б)



в)

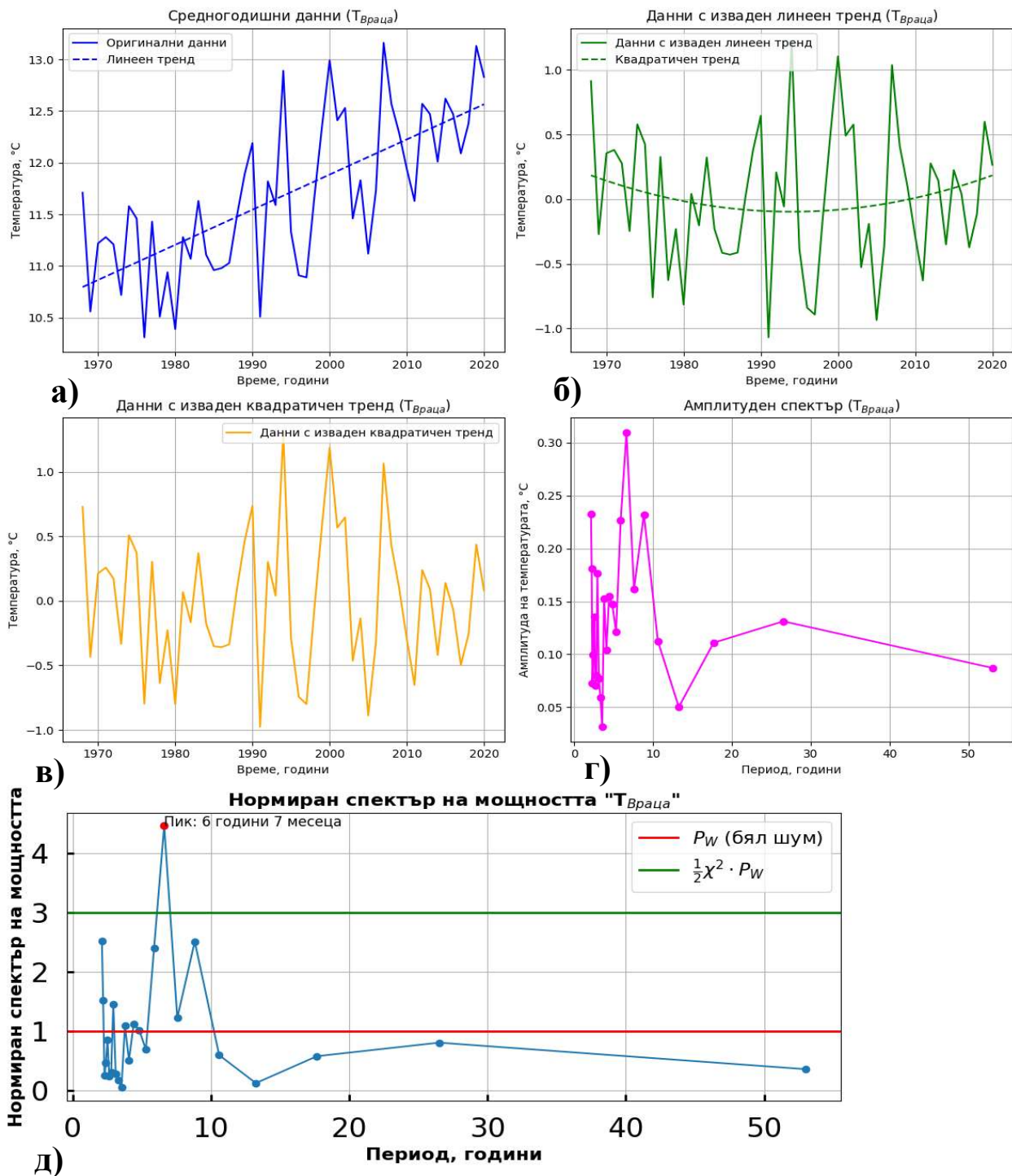


г)

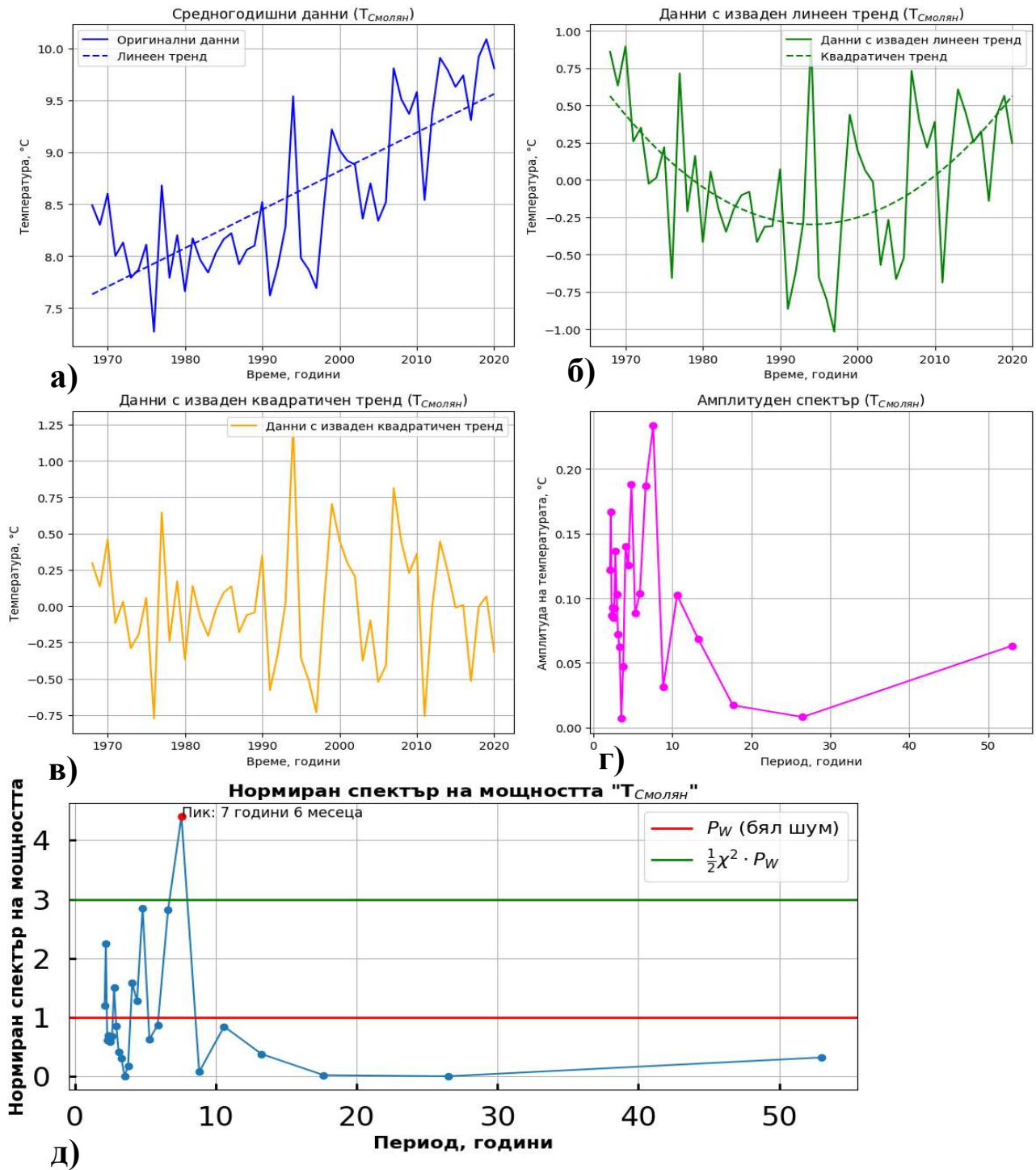


д)

Фиг.5.2.1. Данни за приземната температура във Ловеч : а) с линеен тренд; б) с квадратичен тренд след изваден линеен тренд; в) данните с изваден квадратичен тренд; г) амплитуден спектър на Фурие и д) нормиран спектър на мощността.



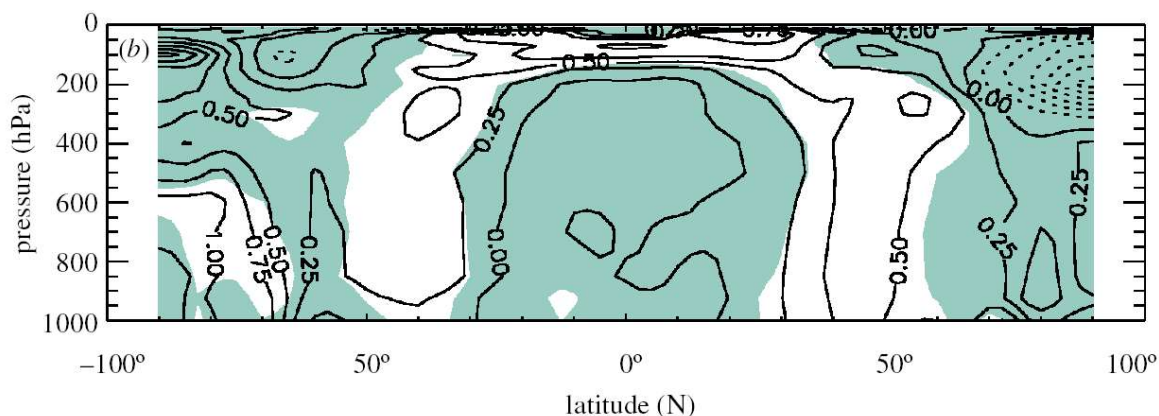
Фиг.5.2.2. Данни за приземната температура във Враца: (а) с линеен тренд; (б) с квадратичен тренд след изваден линеен тренд; (в) данните с изваден квадратичен тренд; (г) амплитуден спектър на Фурие и (д) нормиран спектър на мощността.



Фиг.5.2.3. Данни за приземната температура във Смолян: (а) с линеен тренд; (б) с квадратичен тренд след изваден линеен тренд; (в) данните с изваден квадратичен тренд; (г) амплитуден спектър на Фурие и (д) нормиран спектър на мощността.

Наличието на слънчевия цикъл в температурата в изследваните пещери в ЗКТ, а липсата му в повърхностните температури в регионите близки до пещерите показва, че влиянието на слънчевите параметри върху температурите в пещерите е непряко. Обяснение на механизма за това непряко влияние върху температурите в ЗКТ и на четирите изследвани пещери и приземните температури на трите града в близост до пещерите не може да се даде лесно. Тук ще се направи опит да се изгради хипотеза за обяснението на базата на водния цикъл на пещерите.

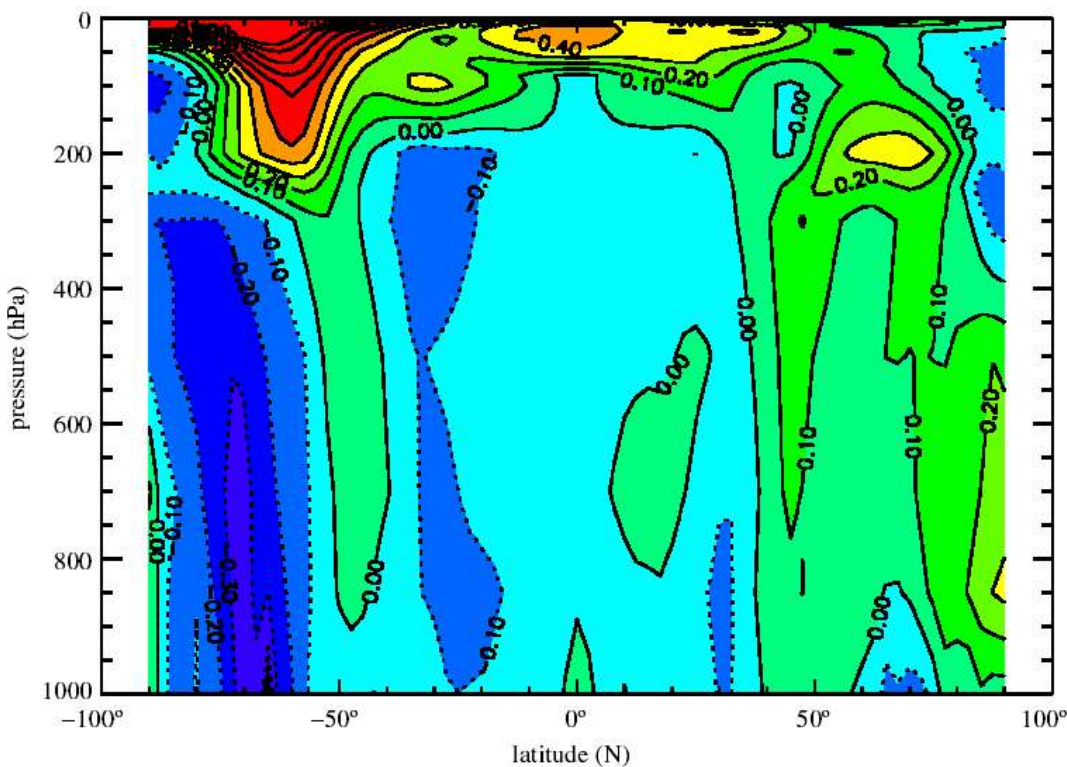
Naigh (2003) е изследвала влиянието на различни индекси, включващо и F10.7 върху средната зонална температура на атмосферата, използвайки множествен регресионен модел, и е установила затопляне на тропичната стратосфера в следствие на слънчевия сигнал (11 годишен цикъл), което се разпространява по-надолу в тропосферата както две ивици от около 30 до 60 градуса географска ширина в двете полусфери. В северната тропосфера слънчевият сигнал е по-висок и стига до стойности между 0.5 и 0.75 K (фиг. 5.2.5).



Фиг.5.2.4. Ефект на слънчевия 11-годишен цикъл върху атмосферна зонална температура получени чрез множествена регресия. В сивите зони влиянието не е статистически значимо (Naigh, 2003).

Larkin et al., (2000) с помощта на общ климатичен циркуляционен модел, в който е взето под внимание въздействието на озона върху спектралния състав на слънчевата радиация, са изчислили влиянието на Слънчевата активност върху зоналните температурни вариации на атмосферата. Между 40 до 60 градуса северна ширина се получава една ивица в цялата тропосфера с разлика на средните температури в минимум и максимум на Слънчевия цикъл до 0.2 K на височина, съответстваща на налягане от около 200 hPa. А близо до земната повърхност не е установено влияние на слънчевата активност в тази зона (фиг.5.2.6).

Типичните дъждовни облаци се разпространяват във височини от 2 км до около 7 км (съответно между около 800 hPa и 400 hPa). Заедно с околната атмосфера водните пари, от които кондензират валежите, са носител на тези температурни вариации. Валежите във вид на дъжд могат да пренесат тези вариации към карстовите системи, протичайки през почвените процепи или чрез речните карстови системи. Понеже водата има много по-висока специфична топлина, въздухът в карстовите пещери лесно приема температурата на водните капки. Особено през силния дъждовен период през късната пролет могат да се пълнят или образуват езерата в пещерите, както в случая с пещерата Снежанка. В ледена пещера дъждовните води влияят на температурния режим в по-слаба степен, защото са по-затворени, отколкото пещерите без ледени образувания.



Фиг.5.2.5 Общ циркуляционен модел (Naigh, 2003 и цитатите в публикацията)

Фронтални дъждове често са свързани със силни циклони, идващи от Средиземно море или от Атлантика, където те се образуват чрез кондензация на изпаряващи се океански води. А те поради големите водни маси се затоплят по-бавно в сравнения с въздушните маси над сушата. Gray et al. (2013) показват, че забавянето на затоплянето е различно в зависимост от океанските региони. За Северния Атлантик същият авторски колектив е намерил регион с три полюса в повърхностни океански температурни аномалии, типично за положителна Северна Атлантическа осцилация, свързана с аномално високи температури над северна Европа, със статистически закъснения спрямо слънчевата активност от 0 до 3 години (Gray et al., 2013).

Изказаните тук предположения трябва да бъдат експериментално проверени чрез допълнителни изследвания. Например, чрез измерване на температурата на дъждовната вода извън пещерите и във вътрешността им близо до ЗКТ и чрез анализ на метеорологичната обстановка.

Тези резултати подчертават значението на 11-годишния слънчев цикъл върху температурните промени в четирите изследвани пещери.

6. Изводи, приноси и перспективи

6.1. Изводи:

Установена е корелационна връзка между S_n (брой слънчеви петна), TSI (пълната слънчева радиация) и F10.7 и микроклимтичните параметри, в частност температурата в Зоната на Константните Температури (ЗКТ) в четирите пещери Съева дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица и чрез коефициент на Пирсън са установени значими коефициенти на корелация.

Получена е корелационна връзка между A_p (геомагнитна активност), и микроклимтичните параметри в частност температурата в Зоната на Константните Температури в четирите пещери Съева дупка, Леденика, Снежанка и Ухловица и чрез коефициент на Пирсън са установени значими корелационни връзки, но по-слаби спрямо връзките между параметрите на слънчевата активност и температурите в ЗКТ.

От пресметнатия нормиран спектър на мощността е открит ясно изразен и значим пик в температурните записи за четирите пещери, съответстващ на 11-годишния слънчев цикъл.

Анализът на данните за температурата на въздуха на повърхността в Смолян, Враца и Ловеч разкрива отчетлив и статистически значим пик около 7.5 години, който вероятно съответства на влиянието на Североатлантическата осцилация (NAO).

Липсата на проява на 11-годишен цикъл в температурата на повърхността и наличието му в ЗКТ показва, че температурата на пещерите не се влияе пряко от повърхностната температура.

6.2. Приноси:

Направено е изследване за топлопроводимостта в дълбочина на карстови масиви в зависимост от сезона и слънчевия цикъл.

За първи път е намерена връзка между температурата на въздуха в четири пещерни системи – Снежанка, Ухловица, Съева дупка и Леденика, разположени в различни климатични региони на България и слънчевата активност, изразена чрез брой слънчеви петна S_n , пълната слънчева радиация (TSI) и F10.7 за времеви интервал с продължителност от 55 години. Използван е коефициент за корелация на Пирсън.

За същия период от 55 години и същите пещери е изследвана корелацията между температурата на въздуха и геомагнитната активност, изразена чрез A_p индекса. Отново е използван коефициентът на Пирсън.

За периода 1968-2020 година е изследвана връзката на температурата за градовете Ловеч, Враца и Смолян и слънчевата активност, изразена чрез брой слънчеви петна S_n , пълната слънчева радиация (TSI) и F10.7. Потвърдено е наличието на цикъл с период около 7.5 години вероятно свързан с NAO.

Установено е, че не съществува пряка връзка между приземните температури и температурите в ЗКТ на изследваните пещери и връзката на пещерните температури със слънчевите параметри се осъществява чрез друг механизъм, а не чрез проникване на приземната температура в дълбочина.

Изказана е хипотезата, че 11-годишния слънчев цикъл в температурата на пещерите се проявява в резултат на температурни вариации в тропосферата, които се пренасят към вътрешността на пещерите чрез водния цикъл.

6.3. Перспективи:

Изследване на повърхностните температури на Пазарджик, намиращ се в близост до пещера Снежанка.

Анализ на база данни от пещери, в които има вече поставени автоматични температурни станции, които да следят дългия ред от микроклиматични данни, както и на температурата на градове близо до тези пещери.

По-добро изследване на модела за топлопренос в карстовите масиви.

Изследване на дълги редове от микроклиматични данни за пещери разположени на други географски ширини и дължини, за да установим глобалността на този процес.

Изследване на дълги редове освен на температурата, примерно на влажността и налягането, извън пещерата и в ЗКТ, както и температурата на дъждовната вода извън пещерата и на водните басейни в пещерата, с които да обогатим информацията си, относно преноса на температура в Зоната на Константните Температури.

Изследване на възможността за бъдещ социален принос на карстовите източници за питейна вода.

С искрена благодарност изразявам признателността си към всички, които подкрепиха и подпомогнаха реализирането на тази дисертация. На първо място, бих искал да благодаря на моя научен ръководител доц. Стоев. Благодаря и на всички мои колеги и преподаватели за техните съвети и вдъхновение. Особено искам да изразя своята признателност към проф. Вернер и проф. Гинева за тяхната безрезервна подкрепа и ценни препоръки, които оказаха значително влияние върху завършването на този труд.

Литература:

A

Ait Brahim, Y., Wassenburg, J.A., Cruz, F.W., et al. (2018). "Multi-decadal to centennial hydro-climate variability and linkage to solar forcing in the Western Mediterranean during the last 1000 years." *Scientific Reports*, v.8, Article 17446. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35498-x>

Anjum, F., Rasool, F., Mohyudin, F., Ameen, A., Naz, M.Y., Ghaffar, A., & Shukrullah, S. (2020). "Study of effect of moisture and temperature on thermal and physical properties of limestone using a transient plane source technique." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863, Article 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012014>

Akimoto, H. (2003). "Global air quality and pollution." *Science*, v.302(5651), pp.1716-1719. DOI: 10.1126/science.1092666.

Akkerhuis, T., & Mast, J. (2016). Quantifying the Random Component of Measurement Error of Nominal Measurements Without a Gold Standard. *Quality and Reliability Engineering International*, 32, 1993 - 2003. <https://doi.org/10.1002/qre.2023>.

Al-Tameemi, M.A., & Chukin, V.V. (2016). "Global water cycle and solar activity variations." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.142, pp. 55-59. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.023>

Anoruo, C.M., & Okeke, F.N. (2020). "Influence of Solar Activities on Climate Change." *Environmental Engineering and Management Journal*, v.19, Issue 8, pp. 1389-1400.

Abduallah, Y., Wang, J., Shen, Y., Alobaid, K. A., Criscuoli, S., & Wang, H. (2021). "Deep Learning Based Reconstruction of Total Solar Irradiance." *ArXiv*. DOI: 10.32473/FLAIRS.V34I1.128356.

B

Badino, G. (2004). "Cave temperatures and global climatic change." *International Journal of Speleology*, v.33, p.10. DOI: 10.5038/1827-806X.33.1.10.

Baker, A., & Genty, D. (1998). "Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing surface land use and increased cave tourism." *Journal of Environmental Management*, v.53, pp.165-175. DOI: 10.1006/JEMA.1998.0208.

Baker, A., Hartmann, A., Duan, W., Hankin, S., Comas-Bru, L., Cuthbert, M., Treble, P., Banner, J., Genty, D., Baldini, L., Bartolomé, M., Moreno, A., Pérez-Mejías, C., & Werner, M. (2019). "Global analysis reveals climatic controls on the oxygen isotope composition of cave drip water." *Nature Communications*, v.10. DOI: 10.1038/s41467-019-11027-w.

Baldini, J. (2010). "The geochemistry of cave calcite deposits as a record of past climate." *Sedimentary Geology*, v.8(4), pp. 4-9. DOI: 10.2110/SEDRED.2010.2.4.

Baldini, J. U. L., McDermott, F., Hoffmann, D. L., Richards, D. A., & Clipson, N. (2008). "Very high-frequency and seasonal cave atmosphere PCO₂ variability: Implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records." *Earth and Planetary Science Letters*, v.272(1-2), pp.118-129. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.04.031.

Bale, S.D., Goetz, K., Harvey, P.R., et al. (2016). "The FIELDS Instrument Suite for Solar Probe Plus." *Space Science Reviews*, v.204, pp.49–82. DOI: 10.1007/s11214-016-0244-5.

Ball, W. T., Unruh, Y., Krivova, N., Solanki, S., Wenzler, T., Mortlock, D. J., & Ja, A. H. (2012). "Reconstruction of total solar irradiance 1974-2009." *Astronomy and Astrophysics*, v.541. DOI: 10.1051/0004-6361/201118702.

Bar-Matthews, M., & Ayalon, A. (2011). "Mid-Holocene climate variations revealed by high-resolution speleothem records from Soreq Cave, Israel and their correlation with cultural changes." *The Holocene*, v.21, pp. 163-171. DOI: 10.1177/0959683610384165.

Barnes, E., & Barnes, R. (2015). Estimating linear trends: Simple linear regression versus epoch differences. *Journal of Climate*, 28, 9969-9976. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0032.1>.

Bhowmik, P., & Nandy, D. (2018). "Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions." *Nature Communications*, v.9, Article 5209. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07690-0>.

Borsato, A., Johnston, V. E., Frisia, S., Miorandi, R., & Corradini, F. (2015). "Temperature and altitudinal influence on karst dripwater chemistry: implications for regional-scale palaeoclimate reconstructions from speleothems." *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.164, pp.482-495. DOI: 10.1016/J.GCA.2015.11.043.

Brigham, E. Oran. *The Fast Fourier Transform and Its Applications*. Prentice-Hall, Inc., 1988. ISBN 0133075052.

Buzjak, N. (2007). "Microclimate as a component of the geocological evaluation of caves - example of the Cave in Belejska komunada (Belej, Island of Cres)." *Geoadria*, v.12, pp.97-110. DOI: 10.15291/GEOADRIA.117.

Buzulukova, N., & Tsurutani, B. (2022). "Space Weather: From solar origins to risks and hazards evolving in time." *Frontiers in Space Sciences*, v.9. DOI: 10.3389/fspas.2022.1017103.

C

Chapanov, Ya., and Gorshkov, V. (2019). "Solar Activity and Cosmic Ray Influence on the Climate." *Geomagnetism and Aeronomy*, v.59, No. 7, pp. 942–949. <https://doi.org/10.1134/S0016793219070090>

Chapanov, Ya., Ron C. and Vondrák, J.:(2015,) Millennial cycles of mean sea level excited by Earth's orbital variations. *Acta Geodyn. Geomater.*, 12, 3 (179), 259–266. DOI: 10.13168/AGG.2015.0028

Chanover, N. J., Uckert, K., Voelz, D. G., & Boston, P. (2023). "The development and demonstration of the portable acousto-optic spectrometer for astrobiology in cave environments." *Earth and Space Science*, v.10, Article e2022EA002370. <https://doi.org/10.1029/2022EA002370>

Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J., & Cliver, E. W. (2014). "Revisiting the Sunspot Number." *Space Science Reviews*, v.186(1-4), pp.35-103. DOI: 10.1007/s11214-014-0074-2.

Constantin, S., Bojar, A., Lauritzen, S., & Lundberg, J. (2007). "Holocene and Late Pleistocene climate in the sub-Mediterranean continental environment: A speleothem record from Poleva Cave (Southern Carpathians, Romania)." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.243(3-4), pp. 322-338. DOI: 10.1016/J.PALAEO.2006.08.001.

Courty, M., & Vallverdú, J. (2001). "The microstratigraphic record of abrupt climate changes in cave sediments of the Western Mediterranean." *Geoarchaeology*, v.16(6). DOI: 10.1002/gea.1002.

Curto, J. J. (2020). "Geomagnetic solar flare effects: a review." *Journal of Space Weather and Space Climate*, v.10(27), pp.1-15. DOI: 10.1051/swsc/2020027.

D

De Freitas, C. R., & Littlejohn, R. N. (1987). "Cave climate: Assessment of heat and moisture exchange." *Journal of Climatology*, v.7, pp. 553-569.

De Freitas, C. R., Littlejohn, R. N., Clarkson, T. S., & Kristament, J. S. (1982). "Cave climate: Assessment of airflow and ventilation." Published by The Royal Meteorological Society.

de Jager, C., & Nieuwenhuijzen, H. (2013). "Terrestrial ground temperature variations in relation to solar magnetic variability, including the present Schwabe cycle." *Natural Science*, v.5, No.10, October 10, 2013.

Delannoy, J., David, B., Geneste, J., Katherine, M., Barker, B., Whear, R., & Gunn, R. (2013). "The social construction of caves and rockshelters: Chauvet Cave (France) and Nawarla Gabarnmang (Australia)." *Antiquity*, v.87, pp.12-29. DOI: 10.1017/S0003598X00048596.

Dermendijev, V.N., Buyukliev, G.T., & Shopov, Y.Y. (1991). "The Prolonged Minima and Maxima of Solar Activity." *Lecture Notes in Physics*, v.428, pp.147-150. DOI: 10.1007/3-540-53955-7_138.

Domínguez-Villar, D., Fairchild, I.J., Baker, A., Carrasco, R.M., & Pedraza, J. (2012). "Reconstruction of cave air temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation

changes: Implications for speleothem palaeoclimate records." *Earth and Planetary Science Letters*, v.353-354, pp.173-182. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.03.017.

Domínguez-Villar, D., Fairchild, I., Baker, A., Carrasco, R. M., & Pedraza, J. (2013). "Reconstruction of cave air temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation changes: Implications for speleothem palaeoclimate records." *Earth and Planetary Science Letters*, v.369, pp.158-168. DOI: 10.1016/J.EPSL.2013.03.017.

Dorale, J. A., Edwards, R., Ito, E., & Gonzalez, L. A. (1998). "Climate and vegetation history of the midcontinent from 75 to 25 ka: A speleothem record from crevice cave, Missouri, USA." *Science*, v.282(5395), pp. 1871-1874. DOI: 10.1126/SCIENCE.282.5395.1871.

Duan, F., Wang, Y., Shen, C.-C., Wang, Y., Cheng, H., Wu, C.-C., Hu, H.-M., Kong, X., Liu, D., & Zhao, K. (2014). "Evidence for solar cycles in a late Holocene speleothem record from Dongge Cave, China." *Scientific Reports*, v.4, Article 5159. DOI: 10.1038/srep05159.

E

Echer, M.P., Souza, Echer, E., Rigozo, N.R., Brum, C.G.M., Nordemann, D.J.R., & Gonzalez, W.D. (2012). "On the relationship between global, hemispheric and latitudinal averaged air surface temperature (GISS time series) and solar activity." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.74, pp. 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.10.002>

Engels, S., & van Geel, B. (2012). "The effects of changing solar activity on climate: contributions from palaeoclimatological studies." *J. Space Weather Space Clim.*, v.2, Article A09. <https://doi.org/10.1051/swsc/2012009>

Ersek, V., Hostetler, S., Cheng, H., Clark, P., Anslow, F., Mix, A., & Edwards, R. (2009). "Environmental influences on speleothem growth in southwestern Oregon during the last 380,000 years." *Earth and Planetary Science Letters*, v.279, pp.316-325. DOI: 10.1016/J.EPSL.2009.01.008.

F

Falasco, E., Ector, L., Isaia, M., Wetzel, C., Hoffmann, L., & Bona, F. (2014). "Diatom flora in subterranean ecosystems: a review." *International Journal of Speleology*, v.43, pp.231-251. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.1>

Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M., Jiménez-Espinosa, R., & Sánchez-Martos, F. (2006). "Geostatistical spatiotemporal analysis of air temperature as an aid to delineating thermal stability zones in a potential show cave: Implications for environmental management." *Journal of Environmental Management*, v.81, Issue 4, pp.371-383. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.11.011.

Flath, D., Kaper, H.G., Wattenberg, F., & Widiasih, E. (2012). *Energy Balance Models*.

Fleitmann, D., & Matter, A. (2009). "The speleothem record of climate variability in Southern Arabia." *Comptes Rendus Geoscience*, v.341(8-9), pp.633-642. DOI: 10.1016/j.crte.2009.01.006.

Forbes, J. (1998). "Air Temperature and Relative Humidity Study: Torgac Cave, New Mexico." *Journal of Cave and Karst Studies*, v.60(1), pp. 27-32.

Franco, A. M. de S., Hajra, R., Echer, E., & Bolzan, M. J. A. (2021). "Seasonal features of geomagnetic activity: a study on the solar activity dependence." *Annales Geophysicae*, 39(6), pp.929–943. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-929-2021>.

Friis-Christensen, E. (1993). "Solar activity variations and global temperature." *Energy*, v.18, Issue 12, pp. 1273-1284. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0360-5442(93)90015-6).

Friedeburg, C. (2003). "Derivation of Trace Gas Information combining Differential Optical Absorption Spectroscopy with Radiative Transfer Modelling."

Fröhlich, C. (2000). "Observations of Irradiance Variations." *Space Science Reviews*, v.94, pp. 15–24. <https://doi.org/10.1023/A:1026765712084>.

G

Gascoyne, M. (1992). "Palaeoclimate determination from cave calcite deposits." *Quaternary Science Reviews*, v.11, pp. 609-632. DOI: 10.1016/0277-3791(92)90074-I.

Ge, J., Deng, C., Wang, Y., Shao, Q., Zhou, X., Xing, S., Pang, H., & Jin, C. (2020). "Climate-influenced cave deposition and human occupation during the Pleistocene in Zhiren Cave, southwest China." *Quaternary International*, v.559, pp. 14-23. DOI: 10.1016/j.quaint.2020.01.018.

Gázquez, F., Calaforra, J.M., & Fernández-Cortés, Á. (2015). "Flash flood events recorded by air temperature changes in caves: A case study in Covadura Cave (SE Spain)." *Journal of Hydrology*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.059>.

Göktürk, O. M., Fleitmann, D., Badertscher, S., Cheng, H., Edwards, R., Leuenberger, M., Fankhauser, A., Tüysüz, O., & Kramers, J. (2011). "Climate on the Southern Black Sea coast during the Holocene: implications from the Sofular Cave record." *Quaternary Science Reviews*, v.30, pp. 2433-2445. DOI: 10.1016/J.QUASCIREV.2011.05.007.

Goldberg, P., & Sherwood, S. (2006). "Deciphering human prehistory through the geoarcheological study of cave sediments." *Evolutionary Anthropology: Issues*, v.15. DOI: 10.1002/EVAN.20094.

Golub, L., DeLuca, E., Austin, G., Bookbinder, J., Caldwell, D., Cheimets, P., Cirtain, J., Cosmo, M., Reid, P., Sette, A., Weber, M., Sakao, T., Kano, R., Shibasaki, K., Hara, H., Tsuneta, S., Kumagai, K., Tamura, T., Shimojo, M., McCracken, J., Carpenter, J., Haight, H., Siler, R., Wright,

E., Tucker, J., Rutledge, H., Barbera, M., Peres, G., & Varisco, S. (2007). "The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission." *Solar Physics*, v.243, pp.63-86. DOI: 10.1007/S11207-007-0182-1.

Gray, L.J., Scaife, A.A., Mitchell, D.M., Ospray, S., Ineson, S., Hardiman, S., Butchart, N., Knight, J., Sutton, R., & Koders, K. (2013). "A lagged response to the 11-year solar cycle in observed winter Atlantic/European weather patterns." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(24), 13,405-13,420. <https://doi.org/10.1002/2013JD020062>

Gregorič, A., Vaupotič, J., & Šebela, S. (2014). "The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia)." *International Journal of Climatology*, v.34, pp. 1488–1500. DOI: 10.1002/joc.3778.

Guardiola, E., Alsina, J., & Rego, J. (2014). "The Influence of Religious and Cosmological Beliefs on the Solar Architecture of the Ancient World." *Journal of Architectural Engineering Technology*, v.1, pp.3-11. DOI: 10.15377/2409-9821.2014.01.01.1.

Gullberg, S. (2015). "Marking Time in the Inca Empire." *Journal of Systems Architecture*, v.1, pp.217-241. DOI: 10.1558/JSA.V1I2.28257.

H

Haigh, J.D. (2003). "The effects of solar variability on the Earth's climate." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v.361, 95-111. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1111>

Haberreiter, M., Finsterle, W., Montillet, J., Walter, B., Andersen, B., & Schmutz, W. (2021). "TSI and TOR measurements with CLARA onboard NorSat-1." DOI: 10.5194/EGUSPHERE-EGU21-6437.

Harrison, P., Jäger, J., Frantzeskaki, N., & Berry, P. (2019). "Understanding high-end climate change: from impacts to co-creating integrated and transformative solutions." *Regional Environmental Change*, 19, pp. 621-627. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01477-9>

Hempelmann, A., & Weber, W. (2012). "Correlation Between the Sunspot Number, the Total Solar Irradiance, and the Terrestrial Insolation." *Solar Physics*, v.277(2), pp.417-430. DOI: 10.1007/S11207-011-9905-4.

Henney, C., Toussaint, W. A., White, S., & Arge, C. (2012). "Forecasting F10.7 with solar magnetic flux transport modeling." *Space Weather*, v.10. DOI: 10.1029/2011SW000748.

Hoffmann, D.L., Standish, C.D., García-Diez, M., Pettitt, P.B., Milton, J.A., Zilhão, J., Alcolea-González, J.J., Cantalejo-Duarte, P., Collado, H., de Balbín, R., Lorblanchet, M., Ramos-Muñoz, J.,

Weniger, G.-Ch., & Pike, A.W.G. (2018). "U-Th dating of carbonate crusts reveals Neanderthal origin of Iberian cave art." *Science*, v.359. <https://doi.org/10.1126/science.aap7778>

Hiremath, K.M., & Mandi, P.I. (2004). "Influence of the solar activity on the Indian Monsoon rainfall." *New Astronomy*, v.9, pp. 651-662. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2004.04.001>

I

J

Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (6th ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-187715-1.

Jones, G.S., Lockwood, M., & Stott, P.A. (2012). "What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near-surface temperature changes?" *Journal of Geophysical Research*, v.117, D05103. <https://doi.org/10.1029/2011JD017013>

K

Kane, R.P. (2007). "Solar terrestrial effects of two distinct types." *Advances in Space Research*, v.39, pp. 1890-1897. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.006>

Karolina Tomczyk-Żak & Urszula Zielenkiewicz (2016). "Microbial Diversity in Caves." *Geomicrobiology Journal*, v.33(1), pp.20-38. <https://doi.org/10.1080/01490451.2014.1003341>

Karmann, I., Cruz, F. W., Viana Jr., O., & Burns, S. J. (2007). "Climate influence on geochemistry parameters of waters from Santana-Pérolas cave system, Brazil." *Chemical Geology*, v.244(1-2), pp. 232-247. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2007.06.029

Kaufmann, G. (2003). "Stalagmite growth and palaeo-climate: the numerical perspective." *Earth and Planetary Science Letters*, v.214(1-2), pp. 251-266. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00369-8

Kopp, G. (2014). "An assessment of the solar irradiance record for climate studies." *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, A14. <https://doi.org/10.1051/swsc/2014012>

Kopraleov, I. (2002). *Geography of Bulgaria. Physical and socio-economic geography*. ForKom, Sofia

Konikow, L.F., & Kendy, E. (2005). "Groundwater depletion: A global problem." *Hydrogeology Journal*, v.13, pp.317-320. DOI: 10.1007/s10040-004-0411-8

Kranjc, A., & Opara, B. (2002). "Temperature monitoring in Kocjanske Jame caves." *Acta Carsologica*, v.31(1), pp. 85-96.

L

Lassen, K., Friis-Christensen, E. (1995). "Variability of the solar cycle length during the past five

centuries and the apparent association with terrestrial climate." *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.57, Issue 8, pp. 835-845. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)00088-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00088-6)

Larkin, A., Haigh, J.D., & Djavidnia, S. (2000). "The effect of solar UV irradiance variations on the Earth's atmosphere." *Space Science Reviews*, 94, 199-214. <https://doi.org/10.1023/A:1026724228211>

Lean, J. (2010). "Cycles and trends in solar irradiance and climate." *WIREs Climate Change*, 1, 111–122. <https://doi.org/10.1002/wcc.018>

Love, J. J., Mursula, K., Tsai, V. C., & Perkins, D. M. (2011). "Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant?" *Geophysical Research Letters*, v.38, L21703. DOI: 10.1029/2011GL049380

Louca, S., & Doebeli, M. (2015). "Detecting cyclicity in ecological time series." *Ecology*, 96, 1724-1732. <https://doi.org/10.1890/14-0126.1>

Lucio, P.S. (2005). "Learning with solar activity influence on Portugal's rainfall: A stochastic overview." *Geophysical Research Letters*, v.32, L23819. <https://doi.org/10.1029/2005GL023787>

M

Maghrabi, A.H., Alamoudi, H.A., & Alruhaili, A.S. (2023). "Investigation of a Possible Link between Solar Activity and Climate Change in Saudi Arabia: Rainfall Patterns." *Atmospheric and Climate Sciences*, v.13, No.4. DOI: 10.4236/acs.2023.134027

Martín-Chivelet, J., Muñoz-García, M. B., Edwards, R. L., Turrero, M. J., Ortega, A. I. (2011). "Land surface temperature changes in Northern Iberia since 4000 yr BP, based on $\delta^{13}\text{C}$ of speleothems." *Global and Planetary Change*, v.77(1-2), pp.1-12. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.02.002

Mammola, S. (2018). "Finding answers in the dark: caves as models in ecology fifty years after Poulson and White." *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ECOG.03905>

McDonald, J., Drysdale, R., Hill, D., Chisari, R., & Wong, H. (2007). "The hydrochemical response of cave drip waters to sub-annual and inter-annual climate variability, Wombeyan Caves, SE Australia." *Chemical Geology*, v.244(3-4), pp. 605-623. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2007.07.007

McPherron, S. P., Gernat, T., & Hublin, J.-J. (2009). "Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds." *Journal of Archaeological Science*, v.36(1), pp.19-24. DOI: 10.1016/j.jas.2008.06.028

Milton, J., & Ohira, T. (2021). *Mathematics as a Laboratory Tool* (2nd ed.). Springer. ISBN: 978-3-030-69578-1.

Muñoz-Jaramillo, A., Vaquero, J.M. (2019). "Visualization of the challenges and limitations of the long-term sunspot number record." *Nature Astronomy*, v.3, pp.205–211. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0638-2>

N

Nikolova N, Noda A. (The Variation of the Surface Air Temperature in Bulgaria under the Global Climate Change.2004. Sofia University Year Book, Geography. vol. 96,. p. 105-114.

Núñez, M. A., Buill, F., & Edo, M. (2013). "3D model of the Can Sadurní cave." *Journal of Archaeological Science*, v.40(12), pp.4420-4428. DOI: 10.1016/j.jas.2013.07.006.

O

Olarinoye, T., Gleeson, T., Marx, V., et al. (2020). "Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater." *Scientific Data*, v.7, Article 59. DOI: 10.1038/s41597-019-0346-5.

Oster, J., Montañez, I., & Kelley, N. (2012). "Response of a modern cave system to large seasonal precipitation variability." *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.91, pp. 92-108. DOI: 10.1016/J.GCA.2012.05.027.

P

Petrova, E., Podladchikova, T., Veronig, A., Lemmens, S., Bastida Virgili, B., & Flohrer, T. (2021). "Medium-term Predictions of F10.7 and F30 cm Solar Radio Flux with the Adaptive Kalman Filter." *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v.254. DOI: 10.3847/1538-4365/abef6d.

Peneva, E., Matov, M., & Tsekov, M. (2023). "Mediterranean Influence on the Climatic Regime over the Balkan Peninsula from 1901–2021." *Climate*, 11(3):68. <https://doi.org/10.3390/cli11030068>

Pike, A., Hoffmann, D., García-Diez, M., Pettitt, P., Alcolea, J., Balbín, R., González-Sainz, C., Heras, C., Lasheras, J., Montes, R., & Zilhão, J. (2012). "U-Series Dating of Paleolithic Art in 11 Caves in Spain." *Science*, v.336, pp.1409-1413. DOI: 10.1126/science.1219957.

Polk, J., Van Beynen, P. V., & Wynn, J. (2012). "An isotopic calibration study of precipitation, cave dripwater, and climate in west-central Florida." *Hydrological Processes*, v.26. DOI: 10.1002/hyp.8169.

Puth, M.T., Neuhauser, M., & Ruxton, G. D. (2014). "Effective use of Pearson's product-moment correlation coefficient." *Animal Behaviour*, v.93, pp.183-189. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.05.003>

Q

R

- Raudys, A., & Pabarskaite, Z. (2018). "Optimising the smoothness and accuracy of moving average for stock price data." *Technological and Economic Development of Economy*, 24, pp. 984-1003. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1216906>
- Reinsel, G., Tiao, G., Meng, X., Choi, D., Cheang, W., Keller, T. L., Deluisi, J., Wuebbles, D., Kerr, J., Miller, A. J., Oltmans, S., & Frederick, J. (1998). "Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data." *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 17149-17161. <https://doi.org/10.1029/98JD00995>
- Repinski, P., Holmgren, K., Lauritzen, S., & Lee-Thorp, J. (1999). "A late Holocene climate record from a stalagmite, Cold Air Cave, Northern Province, South Africa." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.150(3-4), pp. 269-277. DOI: 10.1016/S0031-0182(98)00223-5
- Regattieri, E., Isola, I., Zanchetta, G., Tognarelli, A., Hellstrom, J.C., Drysdale, R.N., Boschi, C., Milevski, I., Temovski, M. (2019). "Middle Holocene Climate Variability from a Stalagmite from Alilica Cave (Southern Balkans)." *Quaternary*, v.2(1), Article 3. DOI: 10.26382/AMQ.2019.02
- Ravbar, N., & Košutnik, J. (2014). "Variations of karst underground air temperature induced by various factors (Cave of Županova jama, Central Slovenia)." *Theoretical and Applied Climatology*, v.116, pp. 327-341. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0955-4>
- Romagnoli, J., & Stephanopoulos, G. (1981). "Rectification of process measurement data in the presence of gross errors." *Chemical Engineering Science*, 36, pp. 1849-1863. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(81\)80133-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(81)80133-9)

S

- Schrijver, C., Livingston, W., Woods, T., & Mewaldt, R. (2011). "The minimal solar activity in 2008–2009 and its implications for long-term climate modeling." *Geophysical Research Letters*, v.38. DOI: 10.1029/2011GL046658.
- Scholz, D., Frisia, S., Borsato, A., Spötl, C., Fohlmeister, J., Mudelsee, M., Miorandi, R., Mangini, A. (2012). "Holocene climate variability in north-eastern Italy: potential influence of the NAO and solar activity recorded by speleothem data." *Climate of the Past*, v.8(4), pp.1367-1378. DOI: 10.5194/cp-8-1367-2012.
- Selvaraj, R.S., Muthuchami, A., & Nancharaiah, M. (2009). "Influence of sunspot activity on the annual rainfall of Tamil Nadu, India." *Indian Journal of Physics*, v.83, pp. 1251–1258. <https://doi.org/10.1007/s12648-009-0106-z>

Shopov, I., Dermendzhiev, V., et al. (1990). "Microzonality of luminescence of cave stalactites as a new indirect index of solar activity." *Българска академия на науките, Доклади*, v.43(7), pp.9-12.

Shopov, Y. Y. (2004). "20 Years Paleoluminescence Techniques." *International Journal of Speleology*, v.33(1-4), pp.5-17.

Shopov, Y. Y., Ford, D. C., Schwarcz, H. P. (1994). "Luminescent Microbanding in speleothems: High-resolution chronology and paleoclimate." *Geology*, v.22, pp.407-410.

Shopov, Y.Y., Tsankov, L., Georgiev, L.N., Damyanova, A., Damyanov, Y., Marinova, E., Ford, D.C., Yonge, C.J., MacDonald, W., Krouse, H.P.R. (1996). "Speleothem luminescence proxy records of annual rainfall in the past evidences for 'The Deluge' in speleothems." In *Climatic Change: The Karst Record (Karst Waters Institute Special Publication 2)*.

Sholtz, D., Frisia, S., Borsato, A., Spötl, C., Fohlmeister, J., Mudelsee, M., Miorandi, R., Mangini, A. (2012). "Holocene climate variability in north-eastern Italy: potential influence of the NAO and solar activity recorded by speleothem data." *Climate of the Past*, v.8(4), pp.1367-1378. DOI: 10.5194/cp-8-1367-2012.

Singh, A.K., & Bhargawa, A. (2020). "Ascendancy of Solar Variability on Terrestrial Climate: A Review." *Journal of Basic & Applied Sciences*, v.16, pp. 105-130. © 2020 SET Publisher. ISSN: 1814-8085, E-ISSN: 1927-5129.

Singh, M. (1998). "Culture of heliotechnology." *Renewable Energy*, v.15(1-4), pp.224-229. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00163-3).

Sommerfeld, A. (1949). "Partial differential equations in physics." New York, Academic Press, (Forth printing 1961), p. 68.

Stoev, A., Shopov, Y. Y., Maglova, P., Ognyanov, O., & Raykova, L. (2023). "Prehistoric Astronomical Observatories and Paleoclimatic Records in Bulgaria Estimate Astroclimate during 4000–4500 BCE: A Critical Assessment." *Quaternary*, v.6(1), Article 6. DOI: 10.3390/quat6010006

Stoeva, P., Stoev, A. (2018). "Influence of the solar activity on cave air temperature regimes." In *Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of the XLI Annual Seminar*, pp. 168-171. DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.168-171

Stoeva, P., Stoev, A., & Kiskinova, N. (2006). Long-term changes in the cave atmosphere air temperature as a result of periodic heliophysical processes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(1-3), 123-128.

Stoeva, P., & Stoev, A. (2005). Cave air temperature response to climate and solar and geomagnetic activity. *Memorie-Societa Astronomica Italiana*, 76(4), 1042.

Šebela, S., & Turk, J. (2011). "Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring." *Theoretical and Applied Climatology*, v.105, pp. 371-386. <https://doi.org/10.1007/S00704-011-0397-9>

T

Tan, L., Cai, Y., An, Z., Cheng, H., Shen, C.-C., Breitenbach, S., Gao, Y., Edwards, R., Zhang, H., & Du, Y. (2015). "A Chinese cave links climate change, social impacts, and human adaptation over the last 500 years." *Scientific Reports*, v.5, Article 12284. DOI: 10.1038/srep12284.

Tapping, K. (2013). "The 10.7 cm solar radio flux (F10.7)." *Space Weather*, v.11, pp.394-406. DOI: 10.1002/swe.20064.

Thernisien, A., Vourlidas, A., & Howard, R.A. (2009). "Forward Modeling of Coronal Mass Ejections Using STEREO/SECCHI Data." *Solar Physics*, v.256, pp.111–130. DOI: 10.1007/s11207-009-9346-5

Tsiropoula, G. (2003). "Signatures of solar activity variability in meteorological parameters." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.65, pp.469–482. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00295-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00295-X)

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). "A practical guide to wavelet analysis." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), pp.61-78.

U

Usoskin, I. G., Solanki, S. K., Schüssler, M., Mursula, K., & Alanko, K. (2003). "Millennium-scale sunspot number reconstruction: evidence for an unusually active sun since the 1940s." *Physical Review Letters*, v.91(21), 211101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.211101.

Usoskin, I.G., Schüssler, M., Solanki, S.K., & Mursula, K. (2005). "Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: A millennium-scale comparison." *Journal of Geophysical Research*, v.110, A10102. <https://doi.org/10.1029/2004JA010946>

V

Valev, D. (2006). "Statistical relationships between the surface air temperature anomalies and the solar and geomagnetic activity indices." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v.31, Issues 1–3, pp. 109-112. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.03.005>

Vaquero, J. M., Gallego, M. C., & Álvarez García, J. (2002). "A 250-year cycle in naked-eye observations of sunspots." *Geophysical Research Letters*, v.29(23). DOI: 10.1029/2002GL014782.

Von Schneidemesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., & Sutton, M. A. (2015). "Chemical Reviews." v.115(10), pp.3856-3897. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00089.

W

Wang, N., & Stephanopoulos, G. (1983). "Application of macroscopic balances to the identification of gross measurement errors." *Biotechnology and Bioengineering*, 25. <https://doi.org/10.1002/bit.260250906>.

Warren, H., Emmert, J., & Crump, N. (2017). "Linear forecasting of the F10.7 proxy for solar activity." *Space Weather*, v.15, pp.1039-1051. DOI: 10.1002/2017SW001637.

Wassenburg, J., Immenhauser, A., Richter, D., Jochum, K., Fietzke, J., Deininger, M., Goos, M., Scholz, D., & Sabaoui, A. (2012). "Climate and cave control on Pleistocene/Holocene calcite-to-aragonite transitions in speleothems from Morocco: Elemental and isotopic evidence." *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.92, pp. 23-47. DOI: 10.1016/J.GCA.2012.06.002.

Weisberg, S. (2005). *Applied Linear Regression* (3rd ed.). Wiley Series in Probability and Statistics. University of Minnesota, School of Statistics, Minneapolis, Minnesota. ISBN 0-471-66379-4.

Werner, R. Valev. D, Danov. D, Guineva, V. (2015). "Study of structural break points in global and hemispheric temperature series by piecewise regression". *Adv. Space Res.* 56, 2323-2334

White, W. B. (2007). "Cave Sediments and Paleoclimate." *KIP Articles*, 784. https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/784.

Wit, T. D. D., & Bruinsma, S. (2017). "The 30 cm radio flux as a solar proxy for thermosphere density modelling." *Journal of Space Weather and Space Climate*, v.7. DOI: 10.1051/SWSC/2017008.

Wolf, R. (1852). "Bemerkungen über die Zahl der Flecken auf der Sonne." *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, v.3, pp.281-286.

X

Y

Z

Zanchettin, D., Rubino, A., Traverso, P., & Tomasino, M. (2008). "Impact of variations in solar activity on hydrological decadal patterns in northern Italy." *Journal of Geophysical Research*, v.113, D12102. <https://doi.org/10.1029/2007JD009157>

Zhao, X., Soon, W., & Velasco Herrera, V. M. (2020). "Evidence for Solar Modulation on the Millennial-Scale Climate Change of Earth." *Universe*, v.6, Article 153. <https://doi.org/10.3390/universe6090153>.

Zharkova, V. V., & Vasilieva, I. (2023). "Terrestrial Temperature, Sea Levels and Ice Area Links with Solar Activity and Solar Orbital Motion." *Natural Science*, v.15, No.9, September 2023. DOI: 10.4236/ns.2023.159018

Zherebtsov, G. A., Kovalenko, V. A., & Kirichenko, K. E. (2017). "The role of solar activity in observed climate changes in the 20th century." *Geomagnetism and Aeronomy*, v.57, pp. 637–644. <https://doi.org/10.1134/S0016793217060147>

Zuidema, R. (1982). "Catachillay: The Role of the Pleiades and of the Southern Cross and ? and ? Centauri in the Calendar of the Incas." *Annals of the New York Academy of Sciences*, v.385, pp.203-229. DOI: 10.1111/J.1749-6632.1982.TB34266.X