

Българска академия на науките
Институт за космически изследвания и
технологии



Цветан Иванов Паров

Влияние на слънчевата активност върху атмосферни процеси
в карстови среди

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за получаване на образователна и научна степен „Доктор“

Област на висше образование: 4. „Природни науки, математика и информатика“

Професионално направление: 4.1. „Физически науки“

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

Научен ръководител:
доцент д-р Алексей Стоев

София 2025 г.

Съдържание:

Въведение.....	3
Цел на дисертационния труд.....	4
Изследователски задачи.....	5
Глава 1: Атмосферни процеси във варовиковия карст на Понор планина и Колкина дупка.....	6
Район на изследването.....	6
Време и място на провеждане на експериментите. Сензори.....	8
Анализ на данните	9
Резултати.....	10
Изводи.....	27
Глава 2. Атмосферни процеси в ледниковия криокарст на Антарктика- Ледено поле Балкан-Перуника, Ледник Джонсън и ледник Контел.....	29
Райони на изследването: ледено поле „Балкан-Перуника“, Ледник „Контел“, Ледник „Джонсън“.....	30
Организация на теренните измервания и сензори за повърхностни и дълбочинни измервания.....	32
Антарктическа климатична аномалия.....	36
Анализ на данните.....	37
Резултати.....	37
Изводи.....	61
Дискусия.....	62
Заклучение.....	66
Приноси	67
Статии на автора по темата на дисертационния труд.....	67
Литература.....	69

1. Въведение:

Този научен труд представлява комплексно изследване на микроклимата в дълбоки пропасти карстови пещери и вертикалните въздушни обеми в криокарстовите пукнатини и дренажни системи на ледници. Изследвано е взаимодействието между външните атмосферни параметри, промените в слънчевата активност и флукуациите на температурния градиент в зоните на константни температури в пещери и ледникови пукнатини. Извършен е двугодишен мониторинг в най-дълбоката и дълга пропаст в България, както и в пукнатините и ледените пещери на три ледника на остров Ливингстън, Антарктика. Анализирани са голям брой данни за промените в слънчевата активност, външните краткосрочни и сезонни температурни промени, атмосферно налягане, промените във вътрешното температурно равновесие и динамиката на въздушните потоци и тяхната зависимост от външната температура. Наблюдаваните зависимости са в съответствие с теорията за влиянието на облачната покривка върху повърхностните температури и с концепцията за антарктическата климатична аномалия около 63° ю.ш. Изучаването на влиянието на слънчевата активност и повърхностните метеорологични параметри върху атмосферните процеси в ледниковия криокарст и варовиковия карст има висока научна, екологична и практическа значимост, свързана с изследването на сладководните ресурси на планетата. В условията на затоплящ и изменящ се климат, изследването допринася за по-доброто разбиране на механизмите, чрез които ще можем да разграничим влиянията на слънчевата активност и антропогенната дейност върху регионалните атмосферни условия и природните процеси. Варовиковият карст и ледниковият криокарст са различни по своята морфология и динамика. На външен вид са подобни, но образуването им е по различен начин. Сравнението им разкрива специфичните взаимодействия между метеорологичните условия и геоморфоложките процеси. С промените в климатичните режими (валежи, температурни вариации) карстовите и ледниковите райони са особено чувствителни към промени, като загуба на снежна покривка (включително и постоянните ледени шапки в алпийските пропасти), изчезване на ледници, ерозия и промяна на водните ресурси. От особено значение е изследването на ледниците на о. Ливингстън в Антарктика, понеже те са разположени на 62° южна ширина, което съвпада с бреговата линия на континента и е близо до Антарктическата конвергенция, която е линията обкръжаваща Антарктика, където студените антарктически води от юг потъват под сравнително по-топлите северни води. Тя преминава приблизително на 55° южна ширина, като в отделни участъци стига до 48° и 61° южна ширина.

Карстовите системи са обитание на уникални и ендемични екосистеми с крехко равновесно положение, които се повлияват дори от минимални вариации на климата. От национално и световно значения са и карстовите води, които се използват като източници на води за питейни и промишлени нужди. Специално в района на изследваната Понор планина, около 10000 души, намиращи се в гр. Своге и околните села, използват карстови води за стопански и икономически цели. От друга страна от ледниковите води в светвен мащаб, зависят повече от 2 милиарда души. Пример за това са Хималаите в Азия, Андите

в Южна Америка и Алпите в Европа. Добавянето на Антрактика към изследването и по-специално изследването на остров Ливингстън от Южни Шетлъндски острови, който се намира на челния фронт на климатичните промени, които засягат Антарктика, ни дава възможност да сравним реакциите на полярните и умерените региони на климатичните промени.

2. ЦЕЛИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Поради различията в геоморфологията и географското местоположение на изследваните региони могат да се разграничат две основни цели:

2.1. Изследването на пропаднатата карстова система на пещерата Колкина дупка в Понор планина, България има за цел да определи:

- Как реагират подземните въздушни обеми на промените в слънчевата активност, дневно-нощните и сезонните температурни колебания и механизма на пренос на топлина от водни потоци от повърхността на земята през 20 километровата карстова система, която е с дълбочина от около -750 м.

- Как влияят колебанията в атмосферните температури и наличието на валежи, особено при смяна на сезоните, върху температурите на въздушните обеми в карстовата система.

2.2. Да се проследи реакцията на вертикалните въздушни обеми в цепнатините на антарктическият ледник Перуника, ледник Контел и ледник Джонсънс на остров Ливингстън в Антарктика по отношение на промени в слънчевата активност, външни климатични промени и вариации в повърхностните температури.

Пукнатините реагират по-бързо на климатичните промени в сравнение с други ледникови структури, което ги прави ценен инструмент за мониторинг на глобалното затопляне.

В съответствие с тези цели, изследователските задачи са представени в 2 основни раздела.

3. ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ЗАДАЧИ:

I. Проучване на карстовите системи в района на Поноор планина (Западна Стара планина, България)- Определяне на температурните и влажностни характеристики на спелеоатмосферата в константната температурна зона на вертикалната многовходова пещерна система. Влияние на слънчевата активност върху спелеоатмосферата.

1. Откриване на връзка между количеството на валежите в района на Поноор планина и стойностите на температурата на въздуха в пещерата, като се разглеждат поотделно зимният и летният сезон.
2. Установяване на корелацията между температурите на въздуха във вътрешността на пещерата на две различни дълбочини, на приблизително -130 метра и на -40 метра и външната температура, измерена на повърхността в района на Поноор планина.
3. Изследване на температурното взаимодействие между входната част на пещерата (граничната зона между променливия и постоянния температурен режим) и дълбоките зони (около -130 метра) през летния и зимния сезон.
4. Определяне степента на корелация между вариациите в слънчевата активност и измененията във вътрешния микроклимат на пещерата през различните сезони.
5. Изследване на влиянието на слънчевата активност върху въздушните течения в пещерата.

II. Изследване на криокарстовите системи на остров Ливингстън (Антарктика). Определяне на температурните характеристики в константната температурна зона на вертикалната система на ледените пукнатини. Връзка между температура, въздушни течения и слънчева активност.

1. Определяне на температурния градиент в пукнатините на ледниците Контел, Джонсън и Балкан.
2. Идентифициране посоката и интензитетът на въздушните потоци в рамките на пукнатинно-дренажните системи.
3. Сравнение на променливостта на дълбочината на зоната с постоянно отрицателни температури за период от една година.
4. Изчисляване степента на корелация между външните температурни параметри, показателите за слънчева активност и метеорологичните условия в пукнатинно-дренажната среда.
5. Физическо достигане на основата на ледника с цел събиране на седиментни проби за последващ геоложки анализ.
6. Търсене на директна връзка между слънчевата активност и термодинамичните процеси в ледниковите пукнатини.

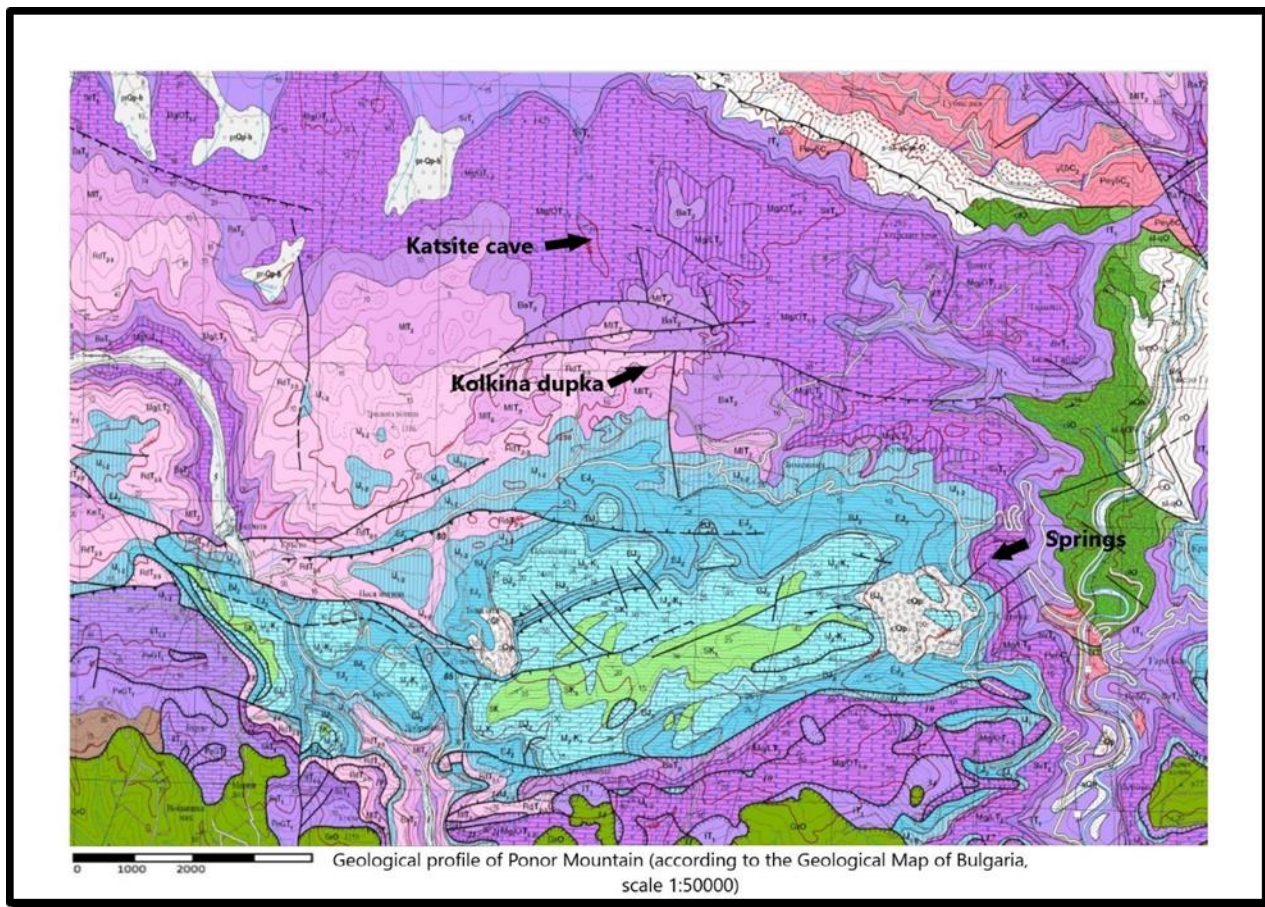
ГЛАВА 1: Атмосферни процеси във варовиков карст- Понор планина и Колкина дупка

Тази глава е насочена към проучването на метеорологичните параметри на близката до Земята атмосфера, повърхността на Земята и карстовите райони, като температура на водата и въздуха, относителна влажност и скорост на вятъра в съответствие с целите на дисертацията. Тези параметри са значително повлияни от слънчевата активност, която от своя страна влияе върху температурното разпределение в подземните карстови кухини, по-специално в пещерата „Колкина дупка“, разположена в Понор планина, част от Западна Стара планина в България. Това е най-дълбоката и най-дълга пещера в страната с дължина над 25 км. и изчислена дълбочина от 800 метра.

Метеорологичните данни в пещерата са събирани с помощта на автоматични логери, докато данните за атмосферните условия на повърхността са получени от Националния институт по метеорология и хидрология. Информацията за слънчевата активност е взета от сайта на Кралската обсерватория на Белгия (SILSO 2024).

Район на изследването

Понор планина се намира в централната част на Западна Стара планина. Това е впечатляващ карстов район, характеризиращ се с равнинен релеф и водосборна площ от 140 km² (Dinev, 1959). Най-широко разпространени са териториите с надморска височина между 1100 и 1300 метра, които включват обширни и сравнително равни поляни. Понор планина е разположена между Петроханския проход и река Гинска на запад, река Искър на изток, ограничена от реките Козля и Искрецка на юг и от Кознишки рид и река Пробойница на север. Планината е слабо населена, като населените места са разположени предимно по периферията ѝ. През годините Понор е привличала множество изследователи, но представлява особен интерес за хидрогеолози и спелеолози. Лесният достъп и близостта до София създават отлични възможности за нейното подробно проучване и изследване.



Фиг. 1. Геоложки профил на Понор Планина, според Геоложката карта на България, мащаб 1:50 000, М 1:50 000, К-34-35-Г (Лакатник) (Ангелов и др., 2008)

В геолошко отношение може да се каже, че планината е изградена от скали, формирани през Долния палеозой и Мезозойската ера. Понор планина е съставена основно от варовици и доломити и представлява една от най-големите и характерни карстови области в България. Проникващите в карбонатните скали води са създали значителни негативни карстови форми като въртопи, понори и слепи долини. В масива на Понор са открити над 70 пещери, но най-дългите и дълбоки са пещера „Каците“ (дълбочина 205 м, дължина 2560 м, надморска височина на входа 1245 м) и „Колкина дупка“ (дълбочина 580 м, дължина 23000 м, надморска височина на входа 1285 м). И двете пещери осигуряват дренаж на подземни води на повече от 10 км (по права линия) до извори в района на с. Гара Бов (Фиг. 1).

В хидрогеолошко отношение районът на Понор планина е изключително интересен. В северната част на планината текат няколко повърхностни реки, чиито води напълно се губят в понори и захранват извори по периферията на карстовия масив. Най-големите извори са Искрецките, с дебит в широки граници – от 260 до 35 900 л/сек (Паскалев и др., 1992). Други по-малки извори се намират в с. Церово и с. Гара Бов, с по-ниски, но също променливи дебита. Водите от всички тези извори са обект на множество хидрогеоложки проучвания. Изследванията на карстовите извори в района на Искрец показват силна

връзка между водоносния хоризонт и карстовата морфология. Дебитът на изворите е в пряка зависимост от сезонните валежи и снеготопенето, което ги прави чувствителни индикатори за климатичните промени. (Бендерев, 1989) (Динев, 1959; Бендерев, 1989), тъй като се използват за водоснабдяване. Особен интерес за настоящото изследване представляват изворите над жп гара Бов, при които чрез трасировъчни тестове с флуоресцеин е доказано, че водите на повърхността произлизат от пещера „Колкина дупка“.

Общата надморска разлика, която подземната река преодолява, е около 800–850 м, като дължината на галериите, по които са преминавали изследователи, надхвърля 20 км (Официален сайт на спелеоклуб „Под Ръба“ – с. Церово, 2025). Това дава основание да се предположи термодинамична циркулация на големи въздушни маси между долината на р. Искър и склоновете на Понор планина. Разтварянето на разтворими скали създава мрежа от подземни канали и кухини, през които се движи водата. Слънчевата радиация може да повиши температурата на повърхностните водни потоци, което води до повишено изпарение и загуба на вода. Това може да има последици върху количеството и качеството на водата в карстовите области. Слънчевата радиация е ключов двигател на енергийния обмен в Земната система. Тя осигурява необходимата енергия за фотосинтеза, изпарение и валежи. Количеството и интензивността на слънчевата радиация, достигаща повърхността на Земята, се влияят от фактори като географска ширина, сезон и атмосферни условия.

Температурата в пещерите е постоянна (Badino, 2004) Според него, пещерите често се описват като среди с постоянна температура. Причината за това е, че скалата предава топлина много бавно. Основно това явление, се отнася до сухи, малки и/или затворени пещерни системи, достигнали стадий на блокажна циментация, при които липсата на входящи водни потоци и въздушна циркулация води до това скалата и нейният геотермален поток да бъдат основният източник на топлина.

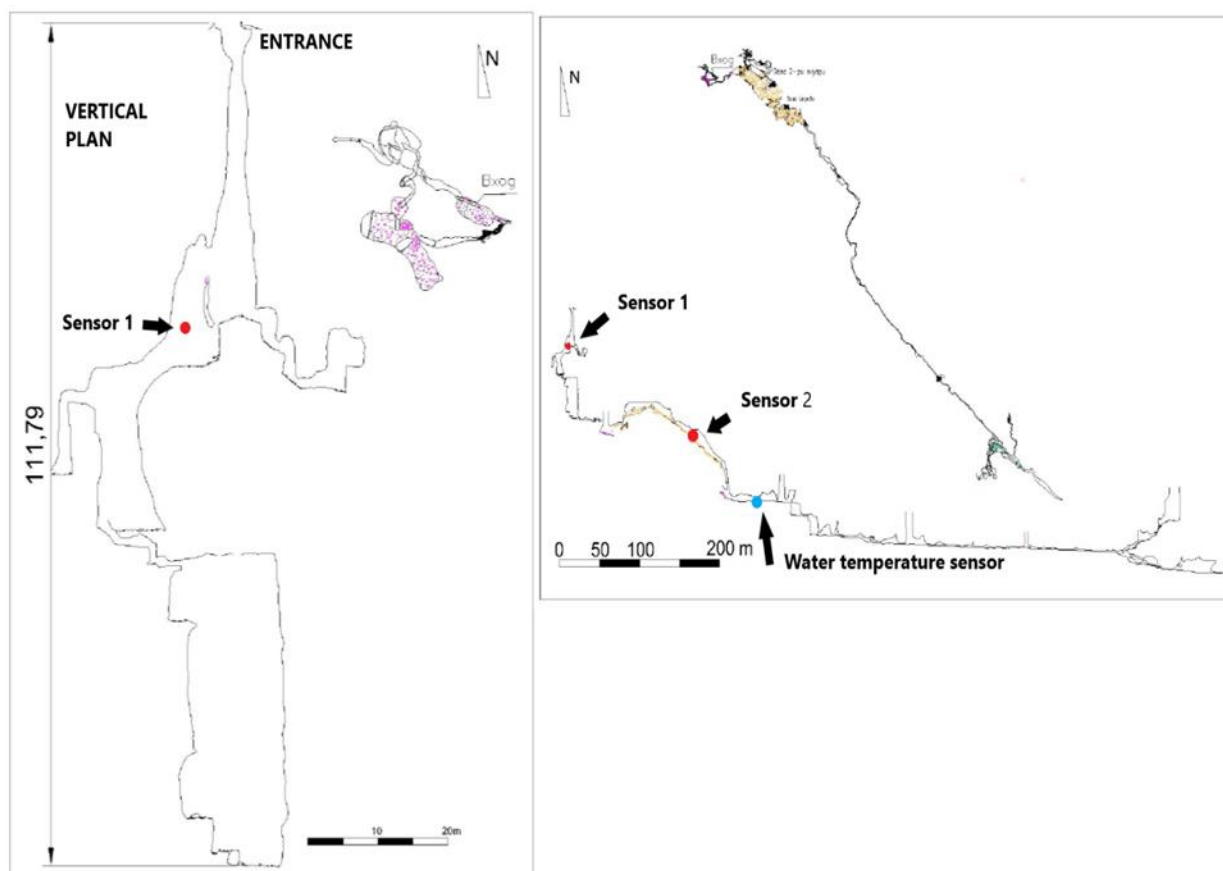
Време и място на провеждане на експериментите. Сензори

Настоящото изследване започва на 28.12.2022 г. като дългосрочен мониторинг, чрез поставянето на два логера с вградени сензори Comet U4130 за запис на температура, влажност и атмосферно налягане. В последствия бяха заменени от сензори *TGP-4500*. Те измерват температури в диапазона от -25 до $+85^{\circ}\text{C}$ и относителна влажност от 0 до 100%. Инструменталната грешка на сензора е $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$. Сензорите са конфигурирани да извършват запис на всеки 60 минути. Позиционирането им е определено след участие в пет експедиции, проведени в пещерата през 2022 г. В крайна сметка са избрани две точки. Първата точка се намира на 40 м вертикално от входа на пещерата (S40), където ясно се проявява границата между външната атмосферна среда и подземната атмосфера. Точката е подбрана така, че да е отдалечена от подземна река.

Втората точка за измерване (S130) е избрана на приблизително 100 м вертикално и около 120 м хоризонтално от първата, в предполагаемата зона на постоянни температури. Сензорът е разположен в най-горната част на наклонена подземна камера с размери: дължина 50 м, ширина 20 м и височина около 10 м. В най-ниската част на камерата протича подземна река. За да се предотврати образуването на конденз, устройствата са поставени в защитни капсули.

В края на юли 2023 г. са инсталирани два допълнителни сензора (Tinytag Aquatic 2) за измерване на температурата на подземната река. Първият е разположен при първата поява на реката на дълбочина -180 м спрямо повърхността, а вторият — при извора, където реката излиза на повърхността. Данните от тези сензори за водна температура бяха изтеглени в началото на 2024 г.

Данните от подземните сензори са изтеглени ръчно с кабел и компютър. За целта са организирани допълнителни експедиции в пещерата през март, април и юли 2023 г. За съжаление през зимния сезон защитата от конденз се оказва недостатъчна и високата влажност води до бързо изтощаване на батериите. Сензорът на дълбочина -130 м (S130) е работил 38 дни, а този на -40 м (S40) – 60 дни. След това сензорите са извадени, сервизирани и върнати обратно в пещерата с подобрени защитни капсули срещу влага. Местоположенията на подземните сензори са отбелязани на Фигура 2.



Фигура 2. Червени точки – сензори S40 и S130, синя точка – сензор за температура на водата (W180).

Анализ на данните

За обработка на получените таблици с данни, съдържащи над 3000 почасови стойности на различни метеорологични параметри, е звършен Пиърсонов корелационен анализ (SPSS 2023), включително двустранни и кръстосани корелации, чрез статистическия софтуер SPSS. Целта е да се изследват статистическите зависимости между температурите на

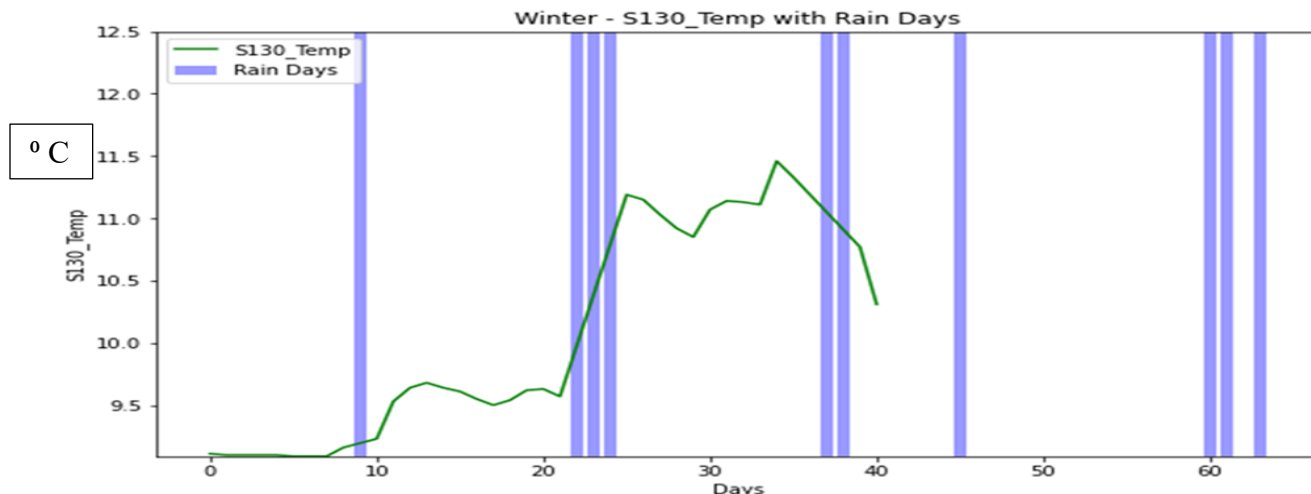
въздуха на различна дълбочина в пещерата (точки S40 и S130) и повърхностните метеорологични параметри както през зимния, така и през летния сезон.

За откриване на циклични атмосферни явления в набора от данни са използвани процедури в програмния език Python, като се сравняват измерванията за всеки ден с тези от седем дни преди и седем дни след това. Получените т.нар. LagResults (изоставачи корелации) представляват таблици с изчисления на забавената корелация между вътрешни и външни параметри – например между температурата в пещерата и температурите на повърхността от предходни дни (1 до 7 дни назад). Също така са изчислени и обратни корелации (обозначени със знак „-“), които представляват корелации между вътрешните температури от минали дни и външните условия от следващи дни. Тези зависимости са използвани, за да се оцени например реакцията на пещерния микроклимат преди и след валежи.

Резултати

Температура в пещерата и количество на валежите: Зимният сезон на 2023 година се характеризира с положителни температури и липса на снежна покривка през януари, последвани от понижение на температурите и основно заледени повърхности през февруари (Национален институт по метеорология и хидрология, 2023). Районът на Понор планина през януари е бил сравнително беден на валежи, с изключение на два периода: на 7 януари, които е 9 ден от началото на измерванията, падат около 20 л/м² за един ден, а в периода 17–19 януари, (съответно 22 и 24 ден от началото на измерванията) – общо 50 л/м² за три дни (Фиг. 7) (НИМХ, 2023). От температурните графики на точка S130 за януари се наблюдава ясно изразено влияние върху температурата в дълбоките части на пещерата, където наблизко преминава подземна река. По отношение на валежите и тяхното въздействие върху температурата в пещерата извършихме следната процедура: за всеки ден изчислихме средните температури в точките S40 и S130 за период от три дни назад и три дни напред (включително текущия ден). След това селектирахме само дните с валежи („Rain“ > 0) и извършихме независим двуизвадков t-тест.

За дълбоко разположения сензор, графиката е представена на фиг.3А



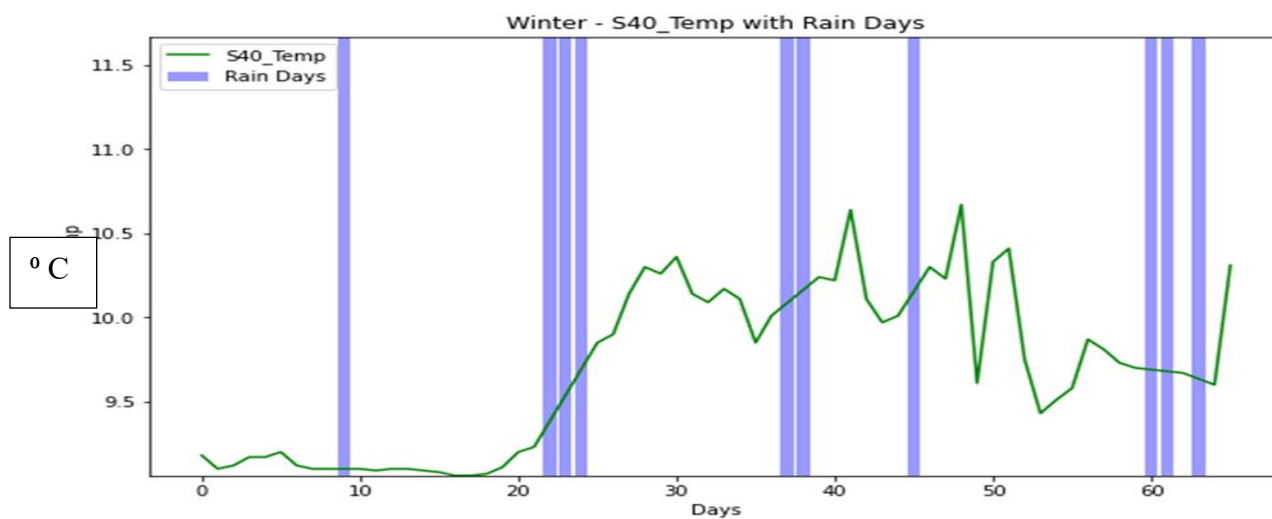
Фиг. 3А. Изменение на температурата на въздуха в пещерата Колкина дупка на дълбочина 130м в зимния сезон на 2023 г. (29 декември - 3 март). Със сини ленти са отбелязани дъждовните дни.

Резултатите от t-тест за зависими извадки между „S_130_average_before“ и „S_130_average_after“

Средна стойност преди: 10.32°C, Средна стойност след: 10.71°C
 $t = -1.42, p = 0.214.$

Средната температура в точка на минус 130 метра под повърхността (S130) за трите дни преди събитието е била 10.32°C, докато за трите дни след това е била 10.71°C.

За плитко разположения сензор, графиката е представена на Фиг. 3Б:



Фиг. 3Б. Изменение на температурата на въздуха в пещерата Колкина дупка на дълбочина 40 м. в зимния сезон на 2023 г. (29 декември - 3 март). Със сини ленти са отбелязани дъждовните дни.

За повърхностния сензор, който е разположен далеч от подземни водоизточници и съответно е изложен на по-ниски стойности на относителна влажност, имахме късмет, че функционира в продължение на 60 дни (Фиг. 3Б). Поради отдалечеността си от подземните реки, по-сухата част на пещерата „филтрира“ слабите температурни колебания, причинени от по-леки валежи, и регистрира само количеството топлина, въведено чрез интензивни валежи с дебит над 20 l/m². През януари, в дните преди силни валежи, повърхностните температури на Понор планина достигат до 15°C.

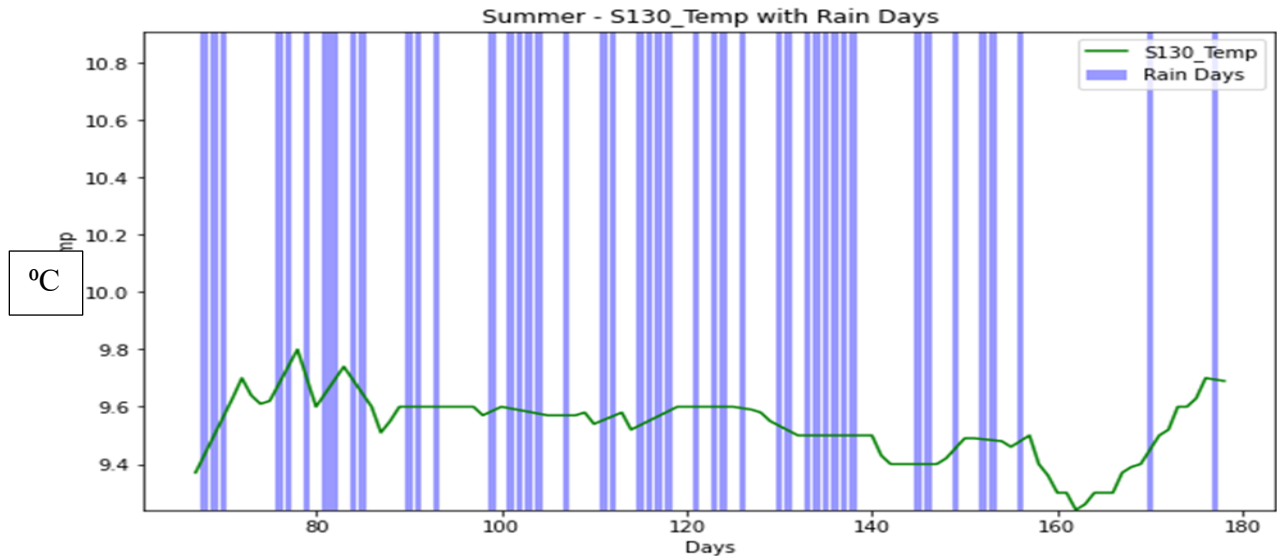
Резултати от t-тест за зависими извадки между „S_40_average_before“ и „S_40_average_after“

Средна стойност преди: 9.68°C, Средна стойност след: 9.83°C

t = -3.48, p = 0.007.

Средната температура в точка S40 за трите дни преди валежите е 9.68°C, а за трите дни след това – 9.83°C. Резултатите показват висока статистическа значимост през зимния период (януари 2023 – март 2023 г.).

През летния период на измерване (от април 2023 до юли 2023 г.) са отчетени изключително много дъждовни дни, при които чрез статистически методи се наблюдават минимални температурни флуктуации. Промени от 0.01°C на повърхността на Земята нямат значително влияние, но в наситената с водна пара влажна пещерна среда, могат да се окажат критични за изместването на точката на оросяване и процесите на кондензация (Badino 2005b). По време на изключително влажните месеци май и юни е регистрирано увеличение от една стотна от градуса в температурата на S130 след валежи (Фиг. 4)



Фиг. 4. Изменение на температурата на въздуха в пещерата Колкина дупка на дълбочина 130м в летния сезон на 2023 г. (4 април – 1 август). Със сини ленти са отбелязани дъждовните дни.

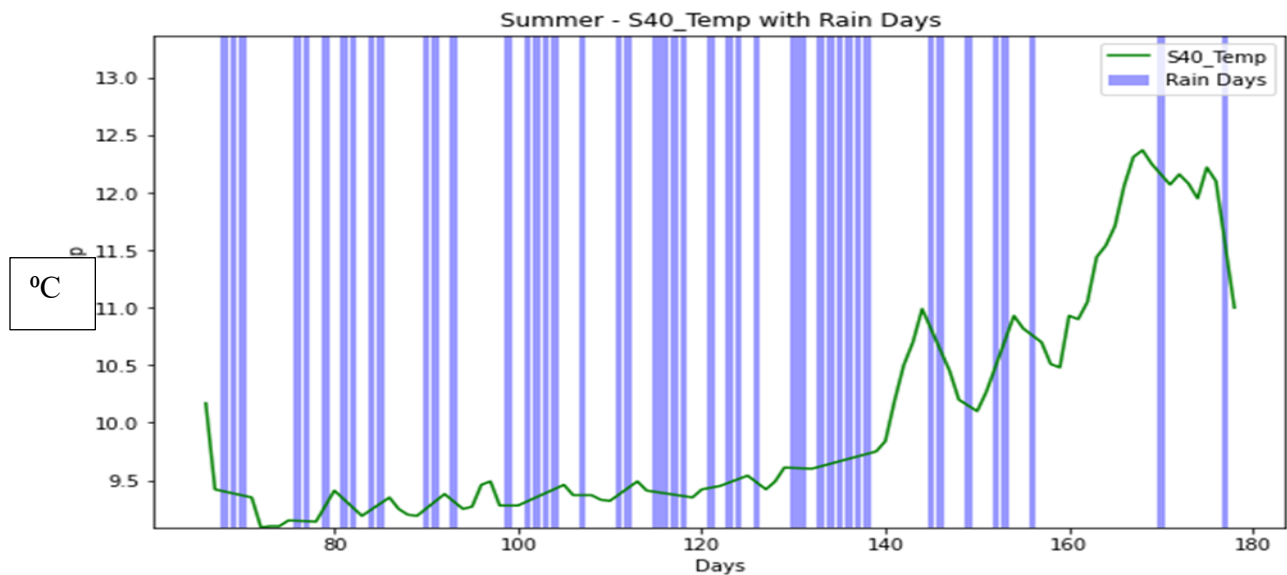
Резултати от t-тест за зависими извадки между „S_130_average_before“ и „S_130_average_after“

Средна стойност преди: 9.56°C, Средна стойност след: 9.57°C
 $t = -1.26$, $p = 0.214$, Степени на свобода: 44

Въпреки това се наблюдава ясна корелация между сезонното повишаване на повърхностните температури (юли с температури около 20–25°C) и повишаването на температурата в точка S40. Близостта до повърхността неутрализира ефекта на топлопреноса, свързан с валежи (Фиг. 5).

Резултати от t-тест за зависими извадки между „S_40_average_before“ и „S_40_average_after“

Средна стойност преди: 9.65°C, Средна стойност след: 9.63°C
 $t = 0.84$, $p = 0.405$, Степени на свобода: 44



Фиг. 5 Изменение на температурата на въздуха в пещерата Колкина дупка на дълбочина 130м в летния сезон на 2023 г. (4 април – 1 август). Със сини ленти са отбелязани дъждовните дни.

Сравнение между температура на въздуха в пещерата на различни дълбочини (Temp S130, Temp S40) и външната температура (Temp_) за летния период

Проведен е Пиърсънов корелационен анализ между външната температура означена с (Temp) и всички останали изследвани променливи (Таблица 1). Целта е да се установи степента на линейна зависимост между температурата на повърхността и вътрешния микроклимат на пещерата през летния сезон.

Таблица 1. Пиърсънови корелации (r) между външната температура (Temp) и Броя слънчеви петна, индексът F 10.7 и температурите на въздуха в пещерата на дълбочини 40м и 130м за лятото.

“p” for outside Temp and Sunspot number index	0.564366
“P” for outside Temp and F10.7 index:	0.624566
“P” for outside Temp and S130_Temp:	-0.584568
“P” for outside Temp and S40_Temp:	0.800119

Такива корелации позволяват да се определи дали повърхностните температурни изменения се отразяват значимо върху температурите на различна дълбочина в пещерата. Очаквано, точка S40 – която се намира по-близо до повърхността – показва по-силна положителна зависимост спрямо външната температура, докато в точка S130 се наблюдават по-слаби или забавени температурни реакции, което отразява буфериращата роля на скалната маса и евентуалното влияние на подземните води.

Изводът е, че при повишаване на външната температура през лятото, плиткия сензор корелира положително а дълбокия отрицателно.

Резултати от лаг-анализа (Lag Analysis):

В Таблица 2 са представени резултатите от сравненията между температурата на въздуха на повърхността и температурата на въздуха в пещерата на различни дълбочини за всеки ден от изследването и стойностите със закъснение от седем дни назад и напред. Включени са само най-значимите корелации, при които максималната стойност на съответствието между променливите настъпва винаги на третия ден:

Ден 3: Наблюдава се максимална корелация между променливите.

Ден 4: Корелацията намалява спрямо Ден 3, но остава значима.

Ден 2 и Ден 5: Корелациите също са значими, но по-ниски от тези на Ден 3.

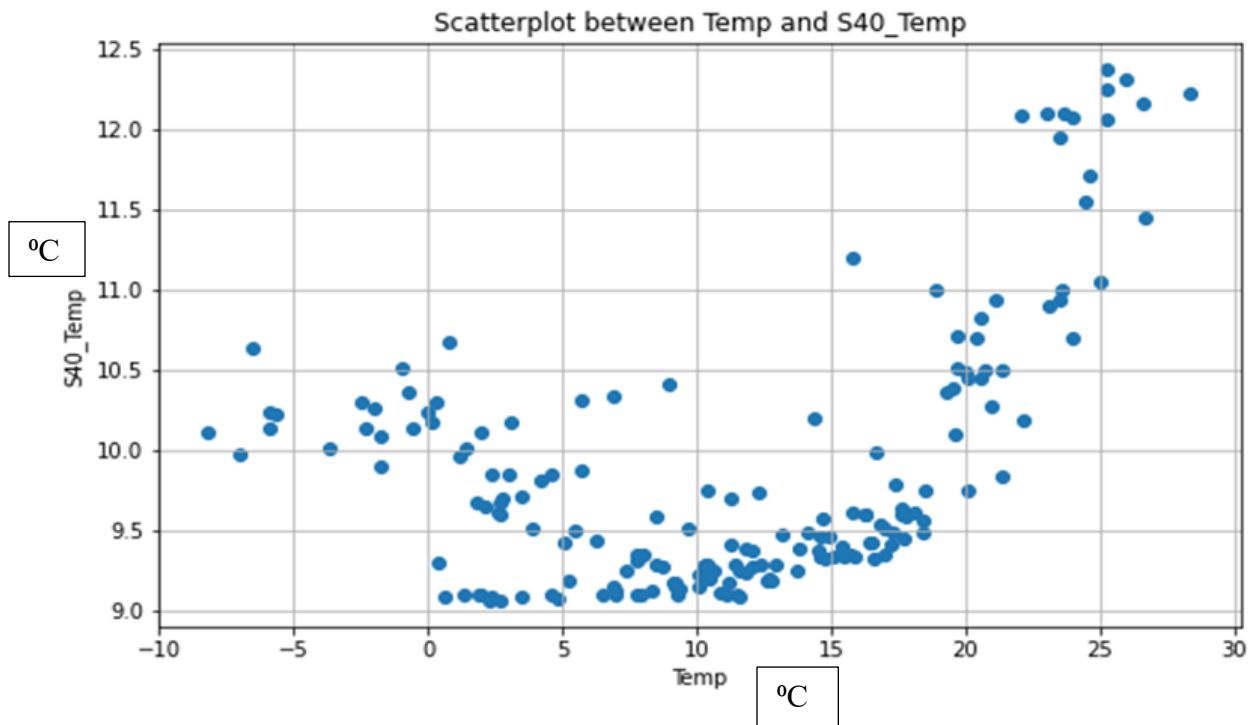
Ден 1, Ден 6 и Ден 7: Корелациите продължават да намаляват и са най-слабо изразени в рамките на проучването.

Таблица 2. Резултати от изместванията (Lag Results) за интервал ± 3 дни.

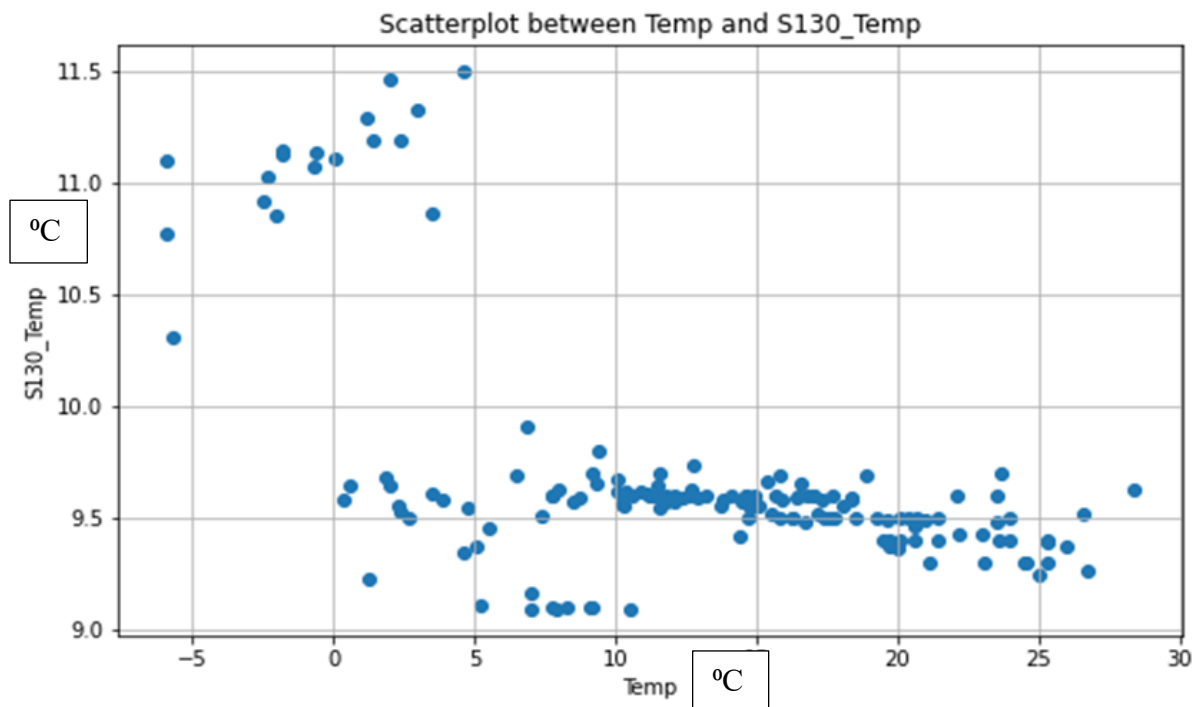
Сензор и ден	Коеф. на Пиърсън
S130_Temp_Lag3	-0.678662
S130_Temp_Lag-3	-0.559663
S40_Temp_Lag3	0.723887
S40_Temp_Lag-3	0.829797

Тези резултати показват, че топлинният обмен между външната атмосфера и подземната среда на карстовата система има цикличен характер, с ясно изразен пиков ефект на третия ден. Това съвпада и с наблюдаваната реакция на подземната температура спрямо покачване на слънчевата активност и външните температури, което потвърждава забавената, но проследима връзка между атмосферните и микроклиматичните условия.

Външната температура показва положителна корелация с температурата, измерена от °сензора на дълбочина (S40), и отрицателна корелация с температурата от дълбокия сензор (S130) (Фиг. 6 и Фиг. 7).



Фигура 6. Графично представяне на корелацията между външната температура (Temp) и вътрешната температура на дълбочина -40 м (temp S40). Една точка представя един ден.



Фиг.7 Графично представяне на корелацията между външната температура (Temp) и вътрешната температура (Temp S130). Всеки точков елемент отговаря на един ден.

Тази зависимост е особено отчетлива при анализ на закъснели корелации – както за три дни назад, така и за три дни напред. Повишението на външната температура се отразява директно и със закъснение върху температурата на въздуха в близост до повърхността на пещерата. В същото време, в дълбоката зона се наблюдава спад в температурата, вероятно поради активиране на низходящ въздушен поток или усилено охлаждане от циркулиращи въздушни маси. Това поведение потвърждава хипотезата за буферна реакция на пещерната система спрямо външните климатични промени и подчертава противоположния термичен отговор на различните дълбочини в карстовата среда.

Основната причина за температурните колебания в пещерата „Колкина дупка“ несъмнено са постъпващите водни потоци, чиято динамика зависи силно от количеството и температурата на валежите. Втората причина са постъпващите въздушни маси, които показват циклични и обратими модели на движение – феномен, който е изследван чрез инсталиране на анемометри през 2024 г. Теплообменът в пещерата е доминиран от водните потоци поради по-високия топлинен капацитет на водата. За чиста вода специфичният топлинен капацитет е приблизително $4.18 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ (или $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$). Това означава, че са нужни 4.18 джаула енергия, за да се повиши температурата на 1 грам вода с 1 градус по Целзий. Поради този висок капацитет, водата може да абсорбира и задържа значително количество топлинна енергия, което я прави важен фактор в редица природни процеси - включително регулация на климата на Земята и използване в отоплителни и охлаждащи системи.

Топлинният капацитет на въздуха, наситен с водни пари, е по-сложна величина, тъй като зависи както от температурата, така и от относителната влажност (RH). В пещерата „Колкина дупка“ е измерена влажност от **98–100%**, което значително влияе на теплообмена. Обикновено се използва смесен подход за изчисляване на топлинния капацитет на влажен въздух – отделно се вземат предвид приносите на сухия въздух и водната пара.

- Специфичният топлинен капацитет на сухия въздух при постоянно налягане (C_p) е приблизително $1.006 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.
- За водната пара $C_p \approx 1.996 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

Формулата за изчисление на топлинния капацитет на влажен въздух е:

$$C_p(\text{влажен въздух}) = C_p(\text{сух въздух}) + (\text{специфична влажност}) \times C_p(\text{водна пара})$$

Така, дори малки изменения в съдържанието на водна пара водят до чувствителни промени в топлопроводимостта и топлинния баланс на подземната система.

Сравнение между температура на въздуха в пещерата на различни дълбочини (Temp S130, Temp S40) и външната температура (Temp_) за зимния период:

Външната температура през зимата корелира отрицателно с температурата, измерена от двата вътрешни сензора. С други думи, когато температурата на повърхността се повишава, вътрешната температура намалява. Когато името на лаг файла е положително ($_lag3$) (Таблица 3), това означава, че вътрешните данни изостават - тоест външната

температура предхожда вътрешната. Обратното важи при отрицателни стойности (_lag-3) (Таблица 4).

Таблица 3. Корелации на Пийърсън за връзката между външната температура (Temp) и хода на температурата във вътрешността на пещерата на дълбочина 40м. и 130м. за зимния период за три дни напред и назад.

S130_Temp_Lag3	-0.714367
S130_Temp_Lag-3	-0.465519
S40_Temp_Lag3	-0.427206
S40_Temp_Lag-3	-0.554904
Temp_Lag3	0.554964
Temp_Lag-3	0.554964

Таблица 4. Корелации на Пийърсън за връзката между външната температура (Temp) и хода на температурата във вътрешността на пещерата на дълбочина 40м и 130м за зимния период

“p” between outside Temp and S130_Temp	0.647297
“p” between outside Temp and S40_Temp	0.544902

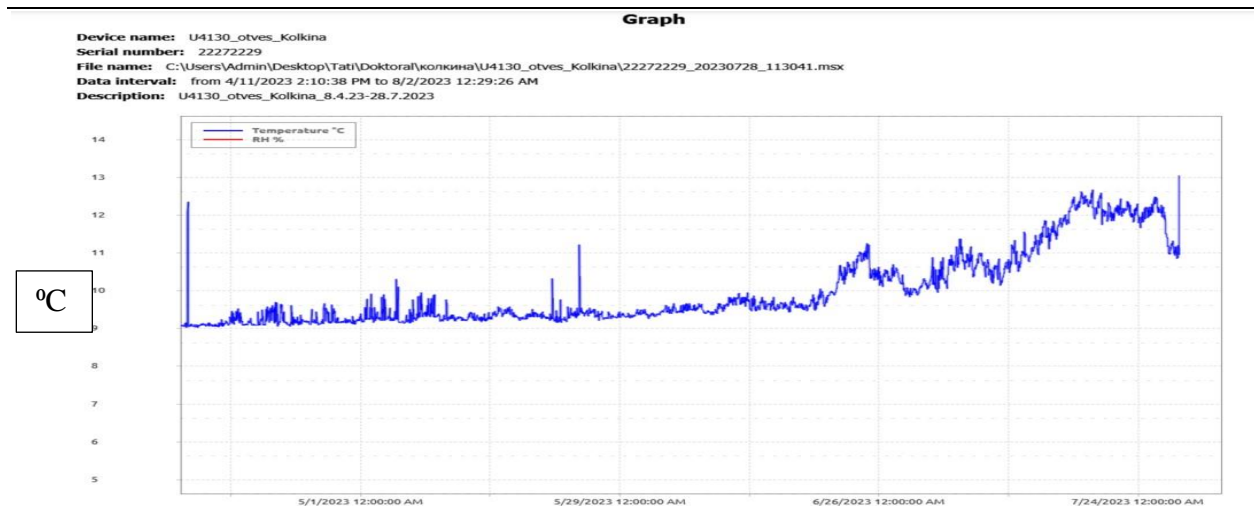
За разлика от лятото, където сензорите отчитат различни поведения на температурата при различните дълбочини, през зимата двата сензора корелират еднакво положително с външната температура.

Проучване на връзката между температурата на въздуха във входната част на пещерата и дълбоките зони:

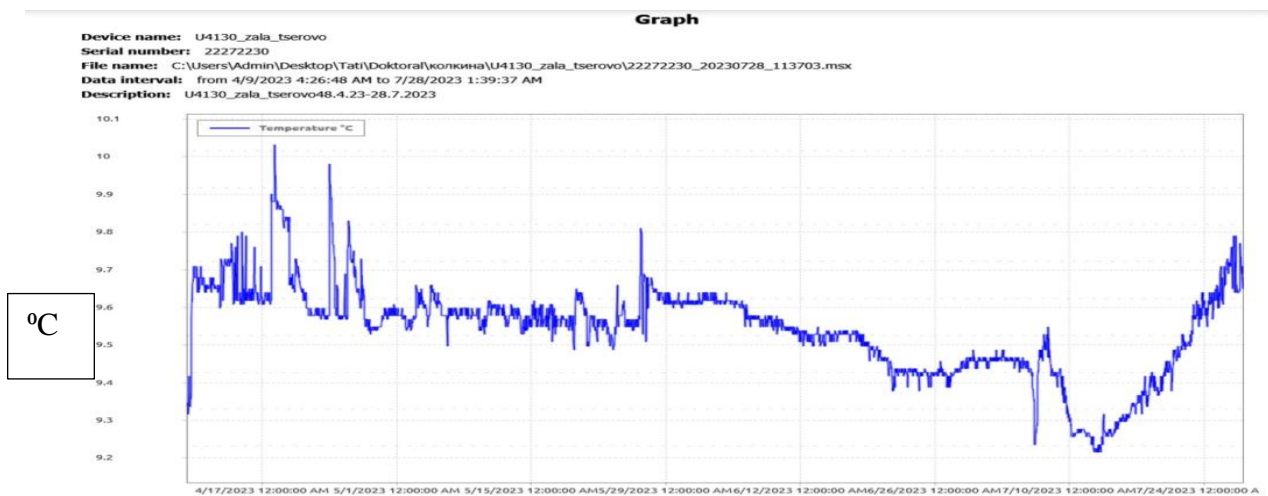
През зимата се наблюдава положителна Пийърсън корелация със стойност $p = 0.89$ между температурите на въздуха, измерени на дълбочина 40м и 130м (точки S40 и S130).

През зимния период, когато на входа на пещерата (на 1300 m н.в.) температурата е ниска (по време на измерванията ни през януари – февруари 2023 г. тя достигна до -15°C), вътре в пещерата атмосферата е значително по-топла (около 9°C), което води до по-ниска плътност на въздуха. Това предизвиква издигане на въздушни течения в масива на планината. Тези въздушни движения обаче са ограничени от топлообмена с външната атмосфера поради наличието на инверсия и натиска на студения повърхностен въздух. В резултат на това се наблюдава понижение на относителната влажност, което е следствие от смесването на два наситени въздушни потока с различни температури.

През лятото се установява отрицателна корелация със стойност $r = -0.537$, което демонстрира, че когато температурата при -40 m се повишава, температурата на -130 m спада (Фиг. 8, 9). Това явление може да бъде обяснено с факта, че през лятото атмосферата вътре в пещерата е по-плътна и по-студена спрямо тази на повърхността. Вследствие на това подземните въздушни маси „потъват“ надолу, като при този процес „засмукват“ по-топъл въздух от повърхността. Това води до повишение на влажността и увеличаване на количеството кондензирана вода по стените на пещерата.



Фиг. 8. Лято (-40m) Ход на температурите за периода от 11.04.2023 до 02.08.2023



Фиг. 9. Лято (-130m) Ход на температурите за периода от 11.04.2023 до 02.08.2023

Промени в параметрите на метеорологичното време (скорост и посока на вятъра, валежи и температура) и реакцията на въздушните течения в пещерата Колкина дупка

Изследването обхваща период от два месеца: (28.05.2024-27.07.2024)

В края на месец май 2024г, успяхме да монтираме ултразвуков анемометър, показан на фигура 10, които да ни даде възможност да регистрираме посоката и големината на въздушните движения в пещерата.



Фигура 10. Позиция и монтаж на анемометъра на дълбочина от -60 метра

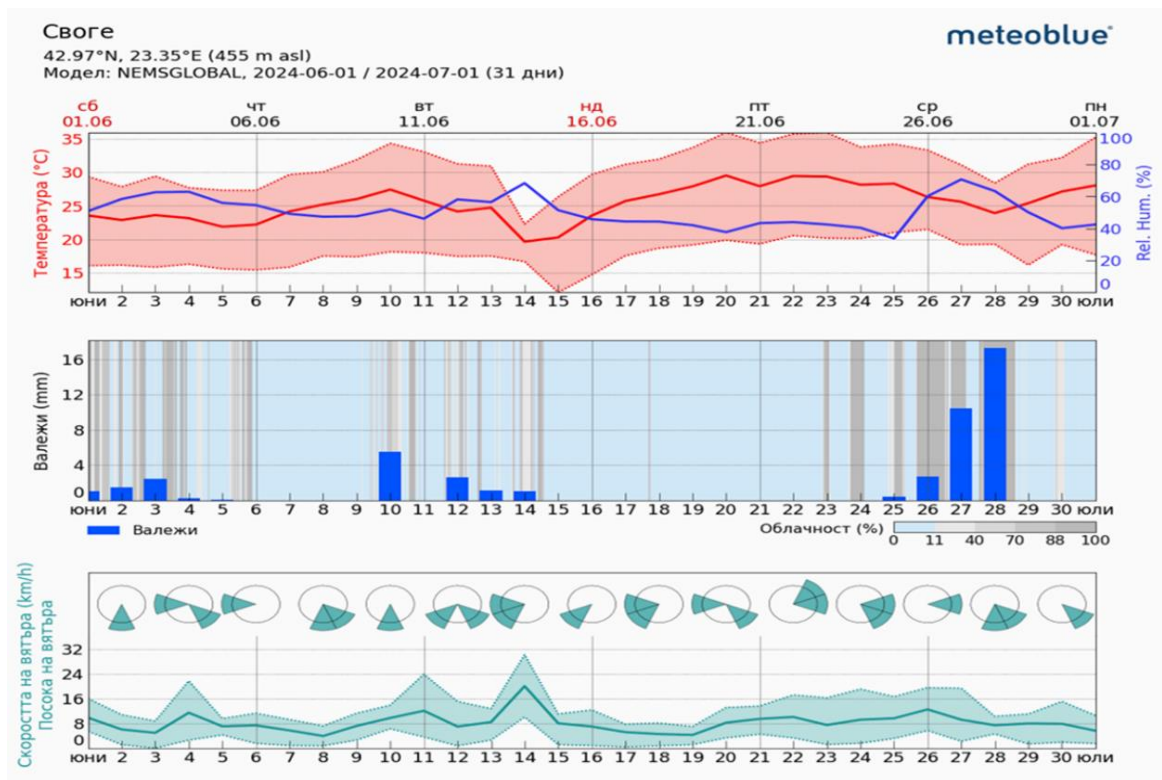
Анемометърът беше поставен в стеснение на дълбочина от -60 метра под повърхността. Резултатите показаха преобладаващо низходящ въздушен поток през пещерата за двумесечния период на измеравне, с изключение на дните, когато на повърхността се разразява силна буря с вятър над 30 км/ч. и спад на температурите.



Фиг. 11. Зависимост на броя записи за посоката на движение на въздушния поток (нагоре или надолу) във входните части на пещерата от времето за период от един месец (29.05.2024 – 29.06.2024) (броят записи съответства на по-интензивно движение).

На (фиг. 11) е представена зависимостта между броя записи за посоката на движение на въздушния поток (нагоре или надолу) във входните части на пещерата и времето за период от един месец (29.05.2024 – 29.06.2024).

Характерно е увеличението на възходящия поток в дните, когато са регистрирани бури, валежи и вятър на повърхността



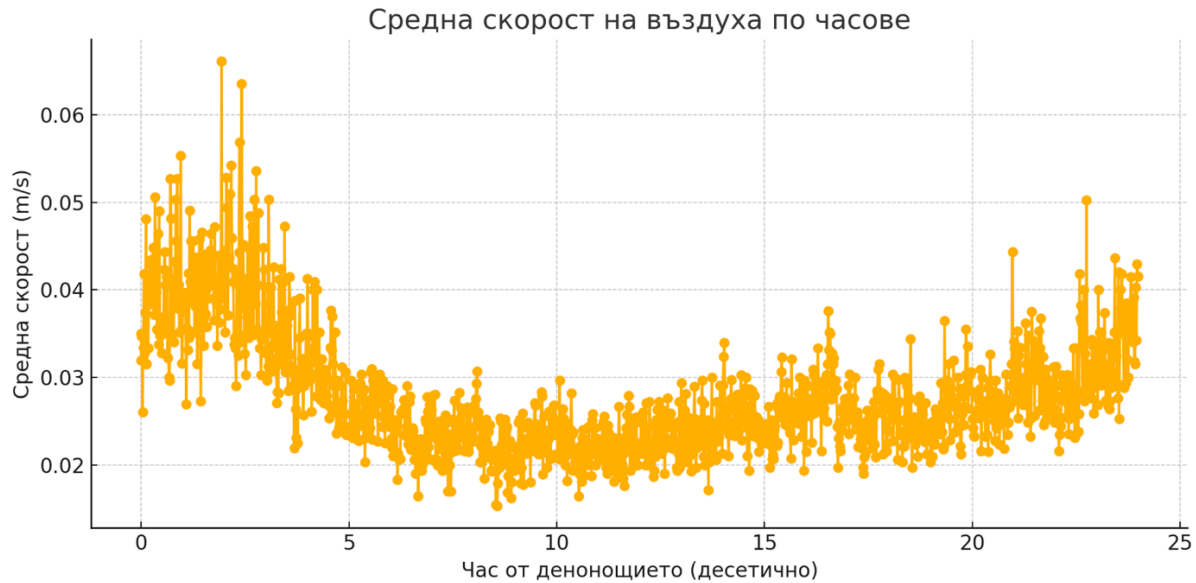
Фигура 12. На графиката са представени времевите метеорологични условия в района на Своге (NEMS GLOBAL, meteoblue) за периода 01.06.2024 – 30.06.2024. На 13 и 14 юни валежите са значителни и това повлиява на въздушните течения в пещерата.

Забелязват се значителни температурни колебания около 13–16 юни, които съвпадат с рязка промяна в честотата на стойностите „нагоре“. Също така, на 26–29 юни се наблюдават повишени валежи и вятър, които съвпадат с отчетливо различна динамика в стойностите на движение на въздушния поток „надолу“ и „нагоре“.

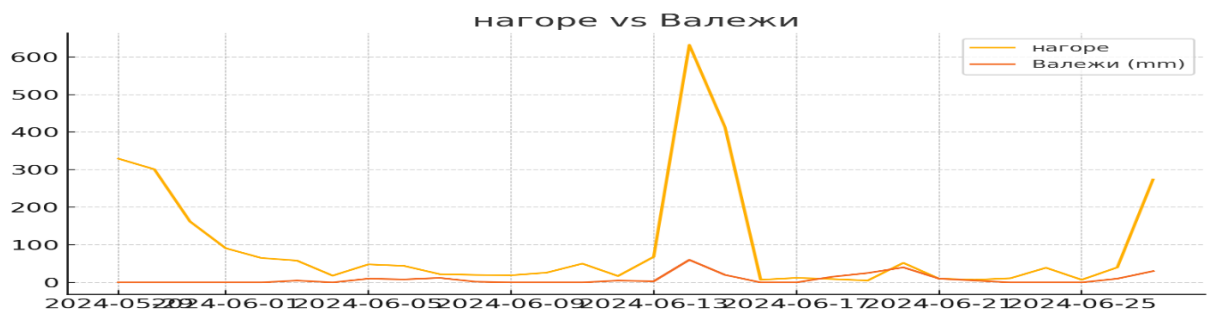


Фигура 13. На графиката - посоката на движение на въздушния поток по часове. Броят записи за посоката на движение на въздушния поток в зависимост от часовете в денонощието (броят записи съответства на по-интензивно движение на въздушните маси)

Фигура 13, показва нагледно как се изменя интензитета на „дишане“ на пещерата спрямо 24 часовия цикъл. В обедните часове въздушната циркулация е по-малка, докато около полунощ се увеличават броя записи, което съответства на по-интензивно движение на въздушните маси.



Фигура 14. Графично представяне на средната скорост на въздушните течения в пещерата спрямо 24 часовия цикъл. Показва, че средната скорост на въздуха след полунощ се увеличава.



Фигура 15. Сравнение на движението нагоре на въздушния поток в Колкина и влиянието на количествата валежи

Валежите регистрират директна връзка с движението на въздуха нагоре. Това може да се дължи на конвективна обмяна. Валежите понижават външната температура и повишават влажността на външния въздух. Така топлият въздух от пещерата излиза през високите входове, а студеният влиза през ниските.

Данните от анемометъра разкриват сложна картина на въздушната циркулация с ясно изразени денонощни вариации, като максималните скорости на въздушния поток се наблюдават в ранните сутринни часове, а минималните - в обедните часове, което се обяснява с термичната конвекция и промените в слънчевата радиация.

Изследване на зависимостта на посоката на движение на въздушния поток в пещерата Колкина дупка от промените в слънчевата активност (брой слънчеви петна и F10,7 индекс):

Изследване на корелацията между движенията на въздуха в пещерата и промените в броя на слънчевите петна и 10.7 см радио потока от Слънцето с RMSE (Root Mean Square Error). Средноквадратичното отклонение /СКО/ или средноквадратичната грешка /СКГ/ е използваната мярка за разликите между стойности, прогнозирани от модел или статистическа оценка, и реално наблюдаваните стойности) „Нормализирана стойност“ означава, че оригиналните данни са преобразувани на обща скала, за да могат различни величини (с различни единици и обхвати) да се сравняват или да се изчисляват метрики като RMSE. Най-често се ползват:

- **Min-max**

нормализация:

$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$ — стойностите стават в интервала [0,1].
 Тогава RMSE също е между 0 и 1.



Фигура 16. Нормализирани стойности на слънчеви петна, въздушни течения „нагоре“ и „надолу“ с изчислени RMSE стойности.

Корелация между въздушния поток „надолу“ и броя слънчеви петна: Линеиният регресионен анализ ни показва статистически значима връзка между броя на слънчевите петна и скоростта на въздушното течение „надолу“. Получената стойност на R² е 0.127, което означава, че приблизително 12.7% от въздушните потоци с посока „надолу“ корелират с броя слънчеви петна. p-стойността е 0.006, което показва значимост

на модела. Това подкрепя хипотезата за влияние на слънчевата активност върху движението на въздуха в пещерата.

Корелацията между въздушния поток „нагоре“ и броя слънчеви петна: Регресионният модел за въздушния поток „нагоре“ показва липса на статистически значима връзка със слънчевите петна. Стойността на R^2 е 0.001 (0.1%), а p -стойността е 0.814, което означава, че слънчевата активност не влияе на скоростта на потока „нагоре“ в пещерата. Това означава, че моделът не е подходящ за прогнозиране.

За допълване на изследването използваме и данните за F10.7 индекса, който показва радиоизлъчването от Слънцето при честота 2800 MHz (или дължина на вълната 10.7 см). Той е един от най-използваните индекси за слънчева активност и корелира добре със слънчевите петна и UV-излъчването. Произходът на излъчването е високо в хромосферата, ниско в короната. Измерва се в sfu (solar flux units), където $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. Типични стойности са циклични и се движат от около 65–75 sfu при слънчев минимум и достигат до 150–200 sfu при слънчев максимум.

Когато индексът F10.7 се повишава, въздушният поток нагоре за деня, обикновено също нараства (положителна връзка). Това личи от значимите рангови корелации: Spearman $\rho=0.377$ и Kendall $\tau=0.257$ към сумата на скоростите за деня.

Ефектът е слаб до умерен и не е линеен (Pearson $r=0.239$, $p=0.069$), т.е. тенденцията е положителна, но с немалък шум.

По време: най-силният сигнал е при закъснение от -2 дена, което означава, че въздушният поток нагоре нараства 2 дена преди нарастването на F10.7 индекса **от -2 дни** – покачване в 10.7 см или 2800 MHz е последвано средно 2 дни след повишение в сумата на скоростите (Pearson $r=0.251$, $p=0.055$). Това е статистическа зависимост, не гаранция за всеки ден! Прозорецът е 2 месеца, така че по-дълга серия би дала по-стабилна оценка.

Корелации между външната температура и температурата, измерена с вътрешните сензори и слънчевата активност (брой слънчеви петна и F10,7 индекс),.

За лятото: при повишаване на слънчевата активност по време на летния сезон, отбелязваме повишаване на външната температура (temp), последвано от повишаване на температурата на -40 метра (S40) и понижаване на температурата на -130 метра (S130). Тоест, през лятото корелациите са положителни с плиткия сензор и отрицателни с дълбокия. Стойностите на коефициента на Пийърсън за корелациите между слънчевата активност (брой слънчеви петна и F10,7 индекс), външната температура и температурата, измерена със сензорите вътре в пещерата са:

Sunspot number and Temp S(130): $p = -0.3764$, F 10.7 index and Temp S(130): $p = -0.4899$

Sunspot number and Temp S(40): $p = 0.3316$, F 10.7 index and Temp S(40): $p = 0.5966$

Sunspot number and outside (temp): $p = 0.5643$, F 10.7 index and outside (temp): $p = 0.6245$

За зимата: Корелациите със слънчевата активност са слаби; при S130 и корелациите с двата индекса са отрицателни, а при S40 са слабо отрицателни със sunspot number и слабо положителни с F10.7. Интересно е, че на практика изчезват корелациите с външната температура (през лятото си ги има):

Sunspot number and temp S(130): $p = -0.4610$, F 10.7 index and temp S(130): $p = -0.3536$,

Sunspot number and temp S(40): $p = -0.4273$, F10.7 index and temp S(40): $p = 0.1122$

Sunspot number and outside (temp): $p = 0.1110$, F 10.7 index and outside (temp): $p = 0.0266$

Обобщено, резултатите подсказват, че вариациите на слънчевата активност могат да модифицират температурните вариации през лятото, особено в повърхностния и близкия подземен слой, докато през зимата това влияние е минимално и трудно доловимо.

Изводи

Извод 1. Намерена е връзка между количествата валежи в Понор планина и температурите в Колкина дупка през летния и зимния сезон. Резултатите от измерванията и корелационните анализи и статистическото моделиране показват, че температурните колебания в изследваната голяма и дълбока подземна система не се влияят от геотермалния поток, а зависят от връзката между температурата в пещерата, която се влияе от температурата на скалата, а тя от своя страна зависи от температурата на преминаващите води, които са силно повлияни от повърхностните условия и също така се променят по време на подземното си протичане през пещерата.

Извод 2. Изследвана е корелацията между температурите на въздуха във вътрешността на пещерата на дълбочини приблизително 40 метра и 130 метра и външната температура, измерена на повърхността в района на Понор планина. Извършен е Пиърсънов корелационен анализ, t-тест за зависими извадки и статистическо моделиране при което се установи сезонна зависимост между различните температури в пещерата „Колкина дупка“ и на повърхността на Понор планина. Резултатите показват значителна отрицателна корелация между температурите на въздуха в дълбоките подземни въздушни потоци (на дълбочина от 130 м) и температурите на входа на пещерата (на дълбочина от 40 м) през зимните месеци. Обратно, през пролетта и лятото се наблюдава обръщане: по-високите външни температури се свързват с повишени температури при входа на пещерата, придружени от по-ниски стойности в дълбоката зона.

Освен това, чрез използване на „забавени корелации“ в анализа на резултатите, т.е. корелации между вътрешните температури и външните температури със седемдневен аванс и изоставане са установени циклични вариации в топлообмена между близката повърхностна атмосфера и подземните температури в карстовата система.

Извод 3: Изследвана е корелацията между входната част на пещерата (граничната зона между променливия и постоянния температурен режим) и дълбоките зони (около – 130 метра) през летния и зимния сезон. Данните показват ясно изразена сезонна зависимост в топлообмена и динамиката на въздушните маси в пещерната система.

През зимата, при наличие на голям температурен контраст между външната и подземната атмосфера, се установява силна положителна корелация ($r = 0.89$) между температурите на 40 и 130 m дълбочина, което свидетелства за термично изравняване и стабилен вътрешен микроклимат с ограничен обмен с повърхността.

Обратно, през лятото се наблюдава отрицателна корелация ($r = -0.537$), характерна за инверсия на въздушния поток топъл въздух от повърхността навлиза в системата и измества студения надолу. Този процес води до повишена влажност и активна кондензация, което показва, че сезонните промени в температурата на повърхността контролират посоката и интензитета на подземната циркулация и влаговия режим в пещерата.

Извод 4: Анализът на корелациите между външната температура, температурите, измерени от вътрешните сензори в пещерата (на -40 m и -130 m), и слънчевата активност (брой слънчеви петна и F10.7 индекс) показва ясно изразени сезонни различия.

През летния сезон повишаването на слънчевата активност съвпада с повишаване на външната температура, което се отразява и на температурата в горните слоеве на пещерата (S40), докато на по-голяма дълбочина (S130) се наблюдава слабо понижаване. Това показва, че слънчевата активност оказва по-силен и директен ефект върху температурите на дълбочини около 40 метра, докато дълбоките температури реагират противоположно и по-слабо. Корелациите са положителни между слънчевата активност, външната температура и температурата на -40 m, и отрицателни за температурата на -130 m. Най-силна връзка се отчита между F10.7 индекса и външната температура ($r = 0.6245$).

През зимния сезон корелациите отслабват значително и са предимно отрицателни както за плиткия, така и за дълбокия сензор. Връзката между слънчевата активност и външната температура почти изчезва, което предполага, че през зимата локалните атмосферни и климатични фактори доминират над влиянието на слънчевата активност.

Извод 5: Анализът на връзката между въздушните течения и слънчевата активност показва следните зависимости:

За въздушния поток “надолу” е установена статистически значима положителна корелация с броя на слънчевите петна, което предполага, че при повишена слънчева активност се усилва движението на въздуха в посока надолу.

За въздушния поток в посока “нагоре” не се наблюдава статистически значима връзка със слънчевите петна, но е налице слаба до умерена положителна зависимост с индекса F10.7. Ефектът се проявява с времево закъснение от около два дни, което може да се тълкува

като индикатор за индиректно влияние на слънчевата радиация върху локалната термодинамика на пещерата.

В заключение, въздушните течения в системата на Колкина дупка са резултат от комплексно взаимодействие между локалните метеорологични условия и слънчевата активност. Основният контролиращ фактор е температурният и наляганен градиент между повърхността и вътрешността на пещерата, но слънчевата активност допринася за модифициране на циркулацията, особено при висока активност и в условия на бързи атмосферни промени.

За точни резултати и анализ е необходимо наблюдение и запис на данни поне по време на един слънчев цикъл с продължителност 11 години. За щастие, в началото на събирането на данни текущият слънчев цикъл (Цикъл 25) е във възходяща фаза, като се очаква достигане на максимум на слънчевите петна през 2025 г. Към момента на писане на дисертационния труд имаме две години непрекъснат мониторинг на температурите в пещерата, както и на температурите на водните потоци.

ГЛАВА 2. Атмосферни процеси в ледниковия криокарст на Антарктика-Ледено поле Балкан-Перуника, Ледник Джонсън и ледник Контел

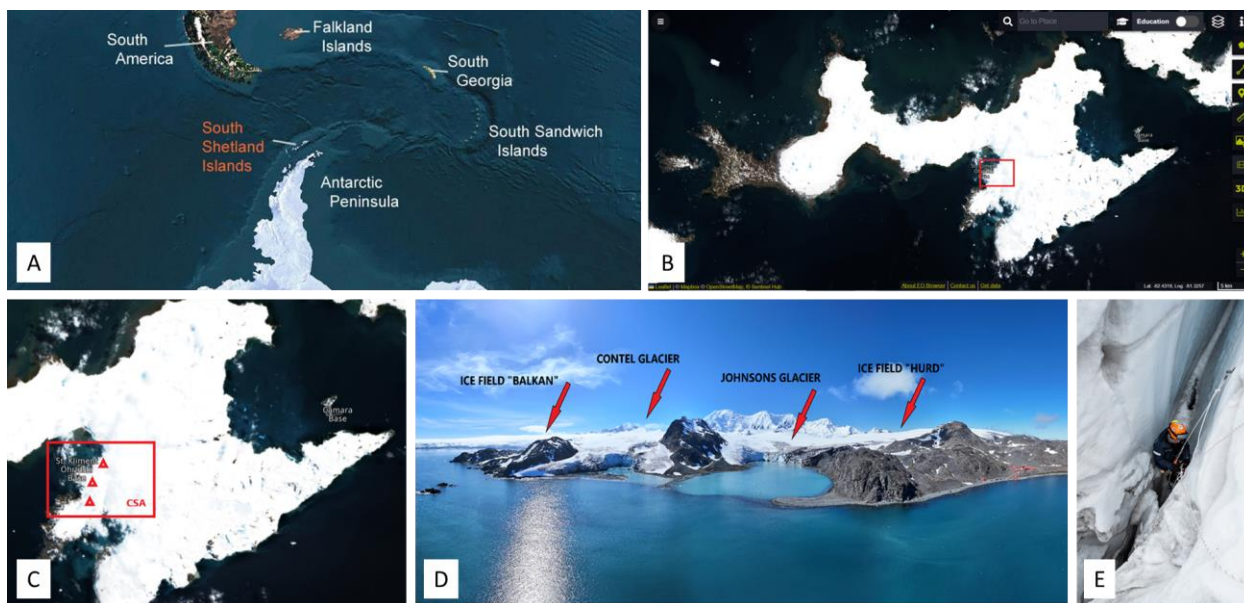
Южните Шетлъндски острови са архипелаг в Южния океан, разположен на около 120 km северно от Антарктическият полуостров, с обща площ приблизително 3687 km², (фиг.21a). Климатът е морски антарктически студен, влажен и ветровит, като летните температури рядко надвишават 2-5 °C, а през зимата често падат под - 10 °C. Геоложкият произход е предимно вулканичен, като на остров Десепшън все още се наблюдава активност. Островите са открити през 1819 г. от ловци на тюлени, а днес попадат под режима на Антарктическият договор, без национален суверенитет, но с множество научни бази – чилийски, аржентински, китайски, испански и български. Българската база „Св. Климент Охридски“ е разположена на остров Ливингстън.

Остров Ливингстън е вторият по големина в архипелага след остров Кинг Джордж, с площ около 935 km² и координати приблизително 62°36'S 60°30'W. Релефът е силно разчленен, доминиран от Тангра планина с върхове над 1700 m, сред които връх Фризланд и връх Симеон. Над 75–80 % от острова е покрит с ледници, включително Перуника, Хърд и Джонсънс. Известен е от началото на XIX в. като обект за лов на тюлени, а името му вероятно произлиза от британския град Ливингстън или фамилия на мореплавател. Научната инфраструктура включва българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ (основана през 1988 г. в залива Емона) и испанската база „Хуан Карлос I“. Днес островът е важен център за научни изследвания, включително глациоложки и климатични наблюдения, биологични проучвания върху пингвини и тюлени, както и геоложки анализи на вулканични и седиментни формации. Благодарение на наличието на сравнително леснодостъпни ледникови системи, пукнатини и дренажни канали, Ливингстън предоставя добри условия за изучаване на връзката между температурните промени и динамиката на ледниците и слънчевата активност.

По време на 32-рата и 33-тата Българска антарктическа експедиция бяха проведени теренни изследвания за проучване на поведението на вертикалните въздушни маси в пукнатинно-дренажните системи на три ледника: леденото поле Балкан, ледник Джонсънс и ледник Контел. Изследването е насочено към връзката между колебанията на метеорологичните параметри на повърхността, вътрешните температури на въздуха в ледниковите пукнатини и възможната им връзка със слънчевата активност. Общата продължителност надхвърля 60 дни, което го прави най-дългото температурно мониториране на ледникови пукнатини в Антарктида. Измерванията на температура на въздуха, влажност и атмосферно налягане се извършваха с автономни сензори, а ултразвукови анемометри регистрираха посока и скорост на въздушния поток вътре в пукнатините. Сензорите бяха разположени на дълбочина до -25 m в централните зони на ледника и до -10 m в зоните близо до краищата на ледниците. По време на изследването се установи отчетлив температурен градиент през всеки 3 m и се картографира дълбочината на зоните с постоянно отрицателни температури. Установена е отрицателна корелация между температурите в пукнатините и повишаване на слънчевата активност. Същата корелация е установена и за въздушната циркулация в пукнатините. Откритата подледникова пещера, намираща се в зоната на контакт между скалата и леда, под леденото поле Балкан ни позволи достъп до субледникови води и пробонабиране на седименти. В пукнатини над протичаща вода се наблюдаваха стабилни температури без зони на трайно отрицателни температури и се отчита засилено повърхностно топене. Зоната на аблация на леденото поле Балкан се е разширила, а зоната с постоянна отрицателна температура се е задълбочила с 6–7 m спрямо предходната експедиция, една година по-рано. Установи се, че малкият ледник Контел проявява по-голяма термична стабилност и устойчивост на изменения в сравнение с по-големите ледени полета. Удължената продължителност на дневната светлина през януари (около 20 часа) улесни надеждното съпоставяне с моделите на слънчевата активност.

Райони на изследването: ледено поле „Балкан-Перуника“, Ледник „Контел“, Ледник „Джонсън“

Изследваният район се намира на полуостров Хърд на остров Ливингстън (Фиг. 17С), който е част от архипелага Южни Шетландски острови в Антарктида (Фиг. 17А). Проучваните ледници са леденото поле „Балкан“, ледникът „Контел“ и ледникът „Джонсън“ (Фиг. 17D).



Фигура 17. А – Местоположение на Южните Шетландски острови, В – Обща карта на остров Ливингстън, С – Увеличен изглед на остров Ливингстън с трите ледника D – Местоположение на ледниците „Балкан“, „Контел“ и „Джонсън“, Е – Монтаж на сензори в ледник „Контел“

Ледено поле „Балкан-Перуника“

Леденото поле „Балкан“ представлява заледеното плато, разположено в източната част на остров Ливингстън, част от архипелага Южни Шетландски острови в Антарктида. Височината му варира между 150 и 280 метра. Снежното поле се намира южно от долната част на ледник „Перунка“, северозападно от ледник „Хънтрес“ и северно от ледник „Контел“. Простира се на 3 километра в дължина (от югозапад на североизток) и 2 километра в ширина. Ако сте прочели до тук, ще получите бутилка уиски на защитата. Ограничено е от хребет „Бърдик“ на изток, нунатаците „Уилън“ и „Кастийо“ на югоизток и скалата „Крум“ на югозапад. Снежното поле има плавен наклон в северозападна посока, като основата му е оградена от хълмове по протежение на българския бряг. Леденото поле „Балкан“ – заедно с ледниците „Перунка“ и „Контел“ – и леденото поле „Хърд“ – включващо ледника „Джонсън“.

Като обект на изследване в две последователни експедиции: В периодите от 15.01.2024 до 15.02.2024 и 29 декември 2024 г. – 15 февруари 2025 г., общо 19 сензора за измерване на температура, относителна влажност, въздушни течения бяха инсталирани на ротационен принцип в и върху изследваните ледници. Всички сензори бяха конфигурирани да записват температура на всеки 30 минути.

Ледник „Контел“-(Фиг. 21D) е ледник с дължина 2 км и ширина 0,74 км, разположен на полуостров Хърд, остров Ливингстън, в Южните Шетландски острови, Антарктида. Ограничен е от хребет „Атлантик Клъб“ на северозапад, скалата „Крум“ на север, леденото поле „Балкан“ на североизток и хребета „Чаруа“ и седловината „Чаруа“ на юг. Ледникът има полумесечна форма, като в горната си част се простира на северозапад, след

което, между хребета „Чаруа“ и скалата „Крумов камък“, завива на запад-югозапад и се оттича в Южния залив, северно от „Джонсънс Док“.

В пукнатина, разположена на границата между зоната на натрупване и зоната на аблация на ледника „Контел“ (Фиг. 21D), в периода 6 януари 2025 г. – 4 февруари 2025 г. са инсталирани три сензора за измерване и запис на температура и относителна влажност. Достигнатата дълбочина за измерване е –11 метра.

Ледник „Джонсън“

(Фиг. 21D) е ледник с дължина 1,8 км и ширина 2,3 км, разположен на полуостров Хърд, остров Ливингстън, ограничен от хребета „Чаруа“ и седловината „Чаруа“ на север, връх „Напие“ на изток, хълма „Мирадор“ на югоизток, ледения купол „Хърд“ (от който се получава леден приток) на югозапад и връх „Рейна София“ на запад. Ледникът се оттича в северозападна посока към залива „Джонсънс Док“. Осигурява сухопътен достъп от испанската база „Хуан Карлос Първи“ до вътрешността на източната част на остров Ливингстън.

Организация на теренните измервания:

Бе извършен обход за търсене на подходящи пукнатини и пещери. За монтирането на сензорите, изминахме повече от 170 км по ледниците на остров Ливингстън (Фиг. 18), за да намерим и проучим подходящи пукнатини. За температурните сензори подбрахме пукнатини, които да са в централната част на ледниците и в тяхната периферия, както и да са на същите географски координати от миналата година за да направим сравнение в данните за периода. Намирането на ледникова пещера, с течаща река вътре, ни даде шанс за поставяне на сензори за температура на въздуха и температура на водата на границата между скалата и леда.



Фигура 18. Кадри от теренни обхождания около връх Чаруа.

За подбор на пукнатини, в които да поставим двата ултразвукови анемометъра, търсихме такива в, които да има наличие на вторични ледени образувания, като сталактити и драперии, които са с аномална форма (изкривени и неправилни), Фиг.19. Отклоненията във формата са индикация за въздушни течения, които ние искахме да измерим.



Фигура 19. Изкривени от въздушните течения вторични ледени образувания

Организация на теренните измервания и сензори за повърхностни и дълбочинни измервания

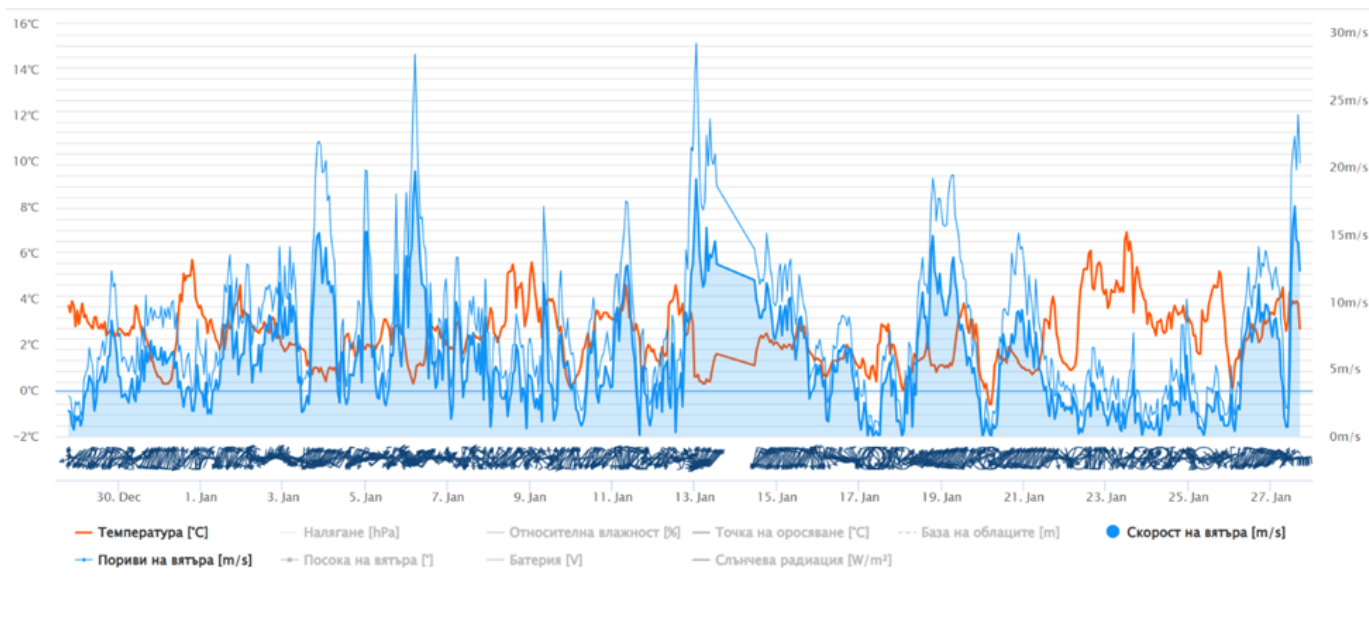
Определянето на статистически значима връзка между слънчевите петна и външната температура на въздуха в полеви условия върху ледниците не беше постигнато. Проблемът се състои във факта, че всички метеорологични станции на остров Ливингстън са монтирани върху скални основи, които през летния сезон и при дълга дневна светлина от 17–18 часа абсорбират големи количества ултравиолетово излъчване от Слънцето и поради високата топлинна инертност на скалите измерванията са подложени на значителни грешки. Опитът за поставяне на логери върху повърхността на ледниковия лед също се оказва неуспешен по същата причина, тъй като в рамките на няколко часа сензорите и техните стойки „потъваха“ около 10 см в леда и се покриваха с вода. За надеждно измерване на външната температура на въздуха разгледахме най-горните сензори, монтирани в ледниковите пукнатини, разположени между 3 и 6 метра под повърхността на леда. За измерванията вътре в пукнатините бяха използвани датчици за регистрация на данни TGP-4500 (Фиг. 20). Те измерват температури в диапазона от -25 до $+85^{\circ}\text{C}$ и относителна влажност от 0 до 100%, като използват вградени сензори. Покритият сензор за относителна влажност (RH) предлага добра устойчивост на влага и конденз както и останалите устройства от серията *Plus 2*. Този точен и надежден уред е особено подходящ за мониторинг в условия на външната среда.



Фигура 20. Сензори: А и В – Сензори за измерване на температурата на въздуха в пукнатините на ледник „Джонсън“, С – Външни метеорологични датчици *Comet U4130*

В допълнение към сензорите, поставени в пукнатините на ледниците, два автономни сензора COMET U4130 бяха инсталирани близо до повърхността на ледника за измерване и запис на външната температура, влажност, точка на оросяване и атмосферно налягане. Същите сензори бяха използвани в продължение на две години за изследване на връзката между приземните атмосферни параметри (Parov, 2023) и температурните промени в подземните обеми на най-дълбоката карстова пещера в България – Колкина дупка.

Данните около ледника се записват на всеки 30 минути, като часовниците на сензорите бяха предварително синхронизирани. Освен това, ежедневно измерванията се сравняваха с данните от метеорологичната станция Meteorocks (Фиг. 21), разположена над базата.



Фигура 21. Графично изображение на данните от метеостанцията.

Сензори за определяне на скорост и посока на вятъра в пукнатината:
В началото на изследването бяха поставени два ултразвукови анемометъра (Фиг.22) на дълбочина 6 метра в ледниковите пукнатини (С2) и (С4) на леденото поле „Балкан“ и ледник „Джонсън“ (JD1) за измерване на посоката и интензитета на въздушния поток. След една седмица измервания първият анемометър бе преместен в (С6), по-близо до края на ледника. Измерванията и записите се извършваха на всяка минута. Производителят Gill Instruments Ltd потвърди, че уредите могат да функционират и при наклонено положение.

Позицията на анемометъра беше наклонена настрани, като стрелката, която обикновено сочи на север, в този случай беше насочена нагоре. Това позволи всички въздушни потоци с ъгъл по-малък от 90° и по-голям от 270° да бъдат класифицирани като „**низходящо движение**“. Обратно, въздушните потоци с ъгъл по-голям от 90° и по-малък от 270° бяха класифицирани като „**възходящо движение**“.



Фигура 22. Ултразвуковите анемометри. Поставяне и подготовка за спускане в пукнатините.

Измерване на температура на водата

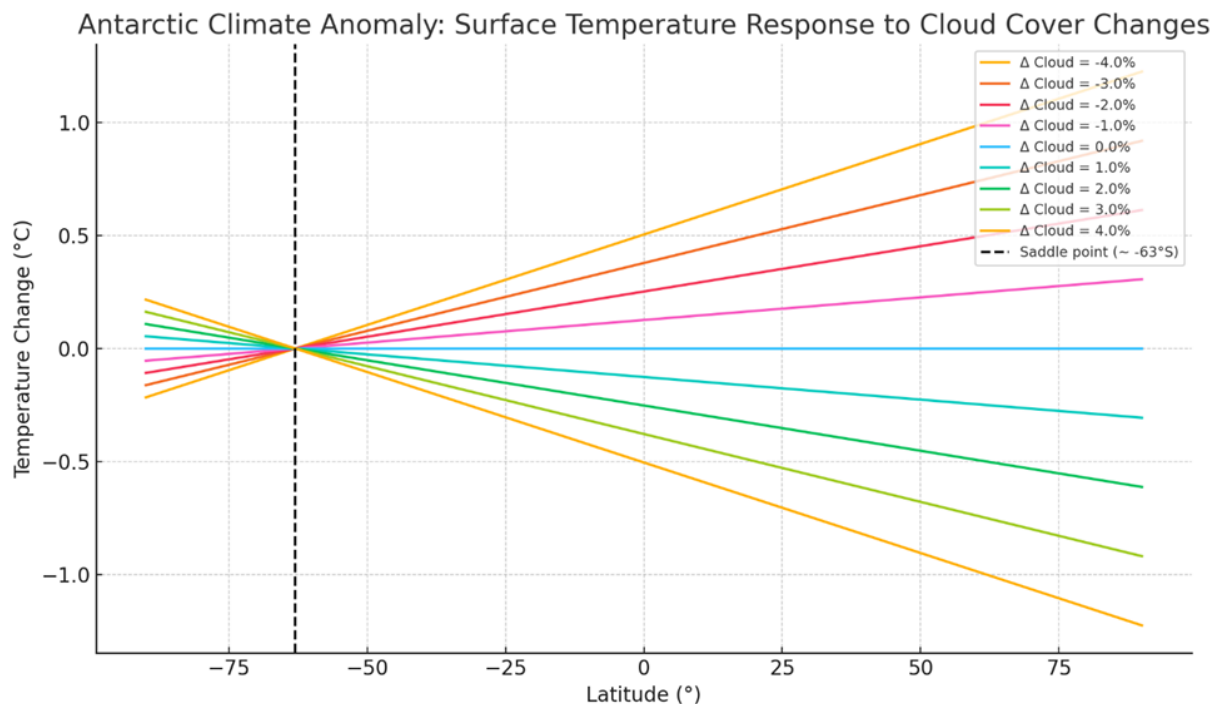
За измерванията на температурата на водата използвахме температурни датчици Tunitag TG-4100. Те са проектирани за продължителна работа под вода на дълбочини до 500 метра. Записват температури в диапазона от -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$. Устройството е поместено в здрава, лесно забележима жълта обвивка и има сигурна точка за монтаж, осигуряваща стабилно закрепване. Този тип сензори са особено подходящи за приложения като мониторинг в рибарството, реките и морските среди.

Антарктическа климатична аномалия

Антарктическата климатична аномалия (Svensmark, 2006) описва уникалната климатична реакция на Антарктика, при която промените в облачното покритие влияят на повърхностната температура по противоположен начин в сравнение с останалата част от света. Навсякъде другаде на Земята повече облаци водят до намаляване на слънчевата радиация и съответно до охлаждане. В Антарктика обаче повече облаци задържат инфрачервеното излъчване и това води до затопляне.

По време на периоди с повишена слънчева активност, потокът на галактичните космически лъчи (GCR) намалява. Това води до намалено облачно покритие. В Антарктика по-малкото облаци водят до увеличаване на радиационните топлинни загуби и охлаждане на повърхността и въздуха.

Тази реакция е най-силно изразена около 63° южна ширина, където се намира т.нар. **седловина** – границата, при която температурният отговор на промените в облачното покритие сменя знака си (Фиг. 23). Отвъд тази точка Антарктика става климатично изолирана от останалата част на света.



Фигура 23. Промени в повърхностната температура на различни географски ширини при увеличаване или намаляване на облачното покритие. (Фигурата е генерирана чрез AI)

Около 63° южна ширина (прекъснатата линия) се наблюдава седловина - преходна зона, в която връзката между облачността и температурата сменя знака си. На север от тази точка: повече облаци водят до охлаждане. На юг от тази точка (Антарктика): повече облаци водят до затопляне (по-малко облаци = охлаждане). Тази точка съответства на

антарктическото крайбрежие и отразява контраста в албедото на повърхността между континенталната суша и заобикалящия я океан.

Анализ на данните

За обработка на температурните показания от всеки сензор, поставен в ледниковите цепнатини, обединихме измерванията чрез изчисляване на почасови средни стойности. Например, всички данни, записани между 11:00:00 и 11:59:59 в даден ден, бяха осреднени, за да представляват стойността за 11-ия час. Тъй като сензорите записваха данни на всеки 30 минути, това обикновено означаваше осредняване на две стойности.

Прилагахме същия метод и за външните метеорологични данни, както и за данните от анемометъра. В случая с анемометъра, обикновено осреднявахме около 60 показания на час (или по-малко, ако липсваха данни). При обработката на данните за въздушния поток, за всеки ден сумирахме всички скорости, класифицирани като „Нагоре“, и всички скорости, класифицирани като „Надолу“. Така получавахме общото количество въздух, придвижил се нагоре, и общото количество въздух, придвижил се надолу за деня, както и разликата между двете.

Това доведе до получаването на една почасова стойност за всеки параметър – включително температурите в цепнатините, външните условия и скоростта и посоката на вятъра. Този подход ни позволи да изследваме корелациите между различните видове данни. За да оценим съгласуваността на температурните измервания, изчислихме дисперсията за всеки сензор. В статистически смисъл дисперсията измерва средното квадратично отклонение от средната стойност и дава представа за степента на колебанията във времето.

За по-задълбочен анализ на набора от данни приложихме корелация на Пийрсън чрез статистическия софтуер SPSS. Това ни позволи да идентифицираме зависимости между температурите на различни дълбочини в цепнатините и външните метеорологични условия и слънчевата активност. За да изследваме допълнително колко дълбоко прониква топлината от повърхността, изчислихме статистическата дисперсия чрез специално написана процедура на програмния език Python.

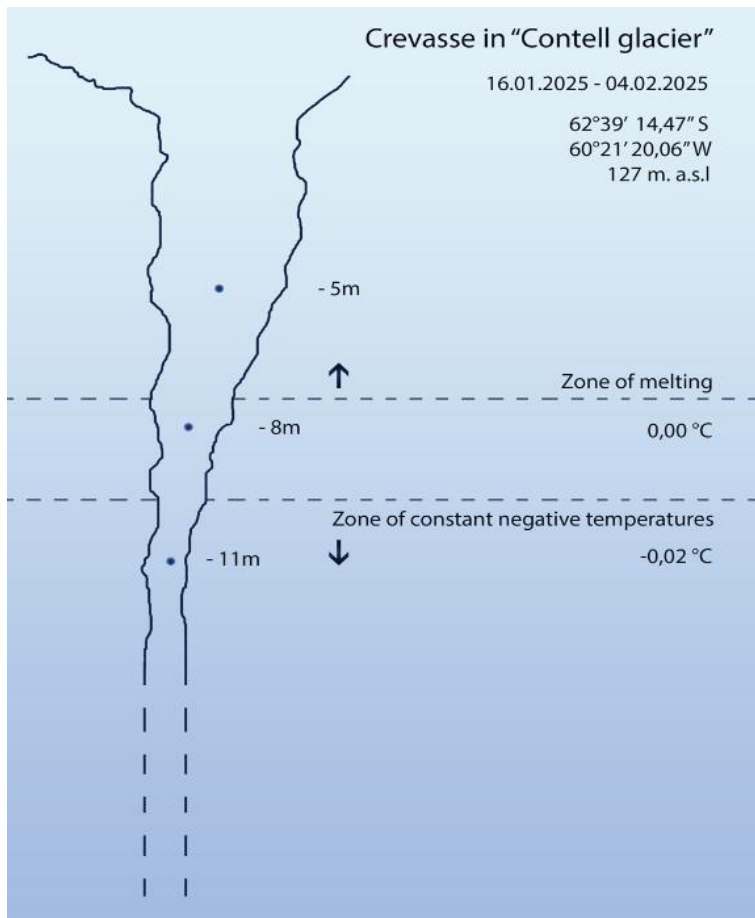
Резултати

Определяне на температурния градиент и дълбочината на проникване на топлината от повърхността. Определяне на въздушните течения.

Ледник Контел (Contell)

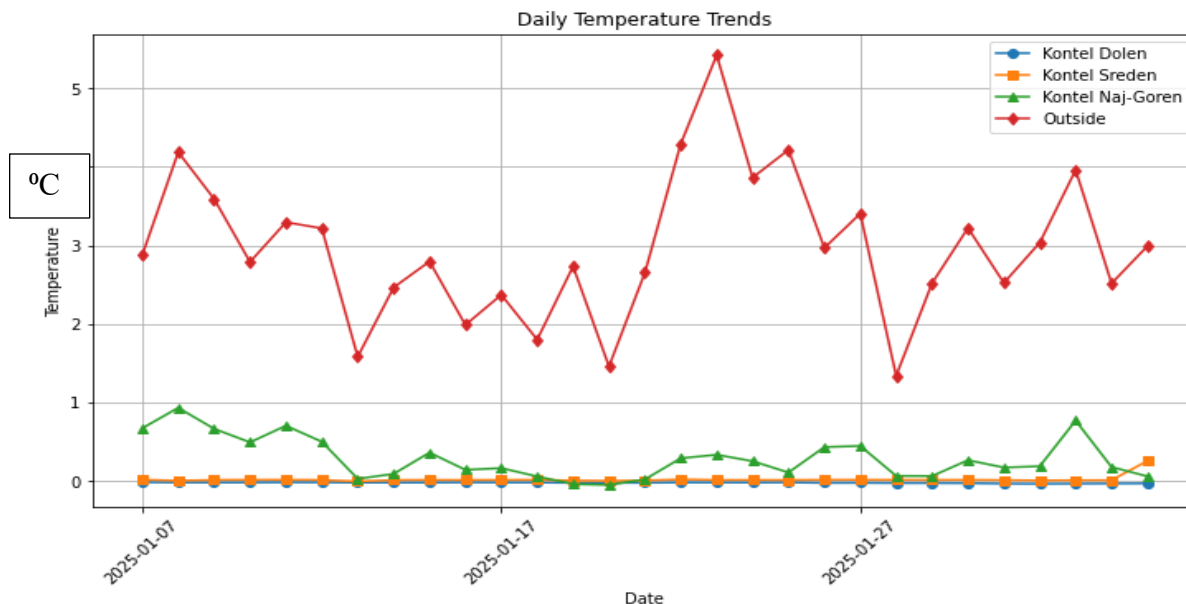
(Фиг. 24) е схематична диаграма, показваща карта на цепнатината с разположението на сензорите за температура на въздуха, като най-горния е разположен на 5 метра под повърхността, а следващите са през 3 метра. Поставени са в пукнатина в централната част

на ледника Contell на границата между зоната на акумулация и зоната на аблация. В периода от 6 януари 2025 г. до 4 февруари 2025 г. измерванията показват стабилност по отношение на външните динамични температурни колебания и наличие на стабилна зона с постоянно отрицателни температури. Температурата на дълбочина 11 метра остава постоянна със стойност (-0,02°C). Ледникът се изследва със сензори за първи път, така че това измерване и идентифицирането на зоната на топене и зоната с отрицателни температури могат да се използват като отправна точка за бъдещи изследвания.



Фигура 24. Схематично представяне на зоната на константни температури в изследваната пукнатина в ледник „Контел“

На фигура 25, графично е определен температурния градиент, като червената линия представя външните температури за периода от един месец, зелената е показанието на сензора на -5 метра и следващите следователно на -8 и -11 метра. Очевидна е зоната на отрицателни температури, неподвластна на външните температурни промени. Ясно се вижда как тенденцията на вътрешните температури се повтаря, като с увеличаване на дълбочината амплитудата на колебанията намалява и температурите стават по-стабилни.



Фигура 25. Зависимост на температурата на въздуха в пукнатината Контел на дълбочини 5, 8 и 11 метра и външната температура в зависимост от времето.

Таблица 1 представя корелациите между температурата във всяка от цепнатините, измерена от сензорите и слънчевата активност, изразена в брой слънчеви петна. Корелациите с P-стойност $< 0,05$ са статистически значими. Тези значими корелации са отрицателни, което означава, че по-ниските температури, измерени в пукнатината са свързани с по-голям брой слънчеви петна.

Независима променлива	Брой дни	Коеф. Пиърсън	на	P-value (Significance level)
Външна температура:	37	0.16		0.35
Темп. в Контел -5 m	28	-0.4		0.03
Темп. в Контел -8 m	28	-0.26		0.01
Темп. в Контел -11m	28	-0.3		0.13

Таблица 1. Корелационни коефициенти между броя на слънчевите петна и вътрешните температури.

Поради отдалечения и труден достъп до пукнатините на ледник Контел, в него не сме монтирали анемометър за измерване на въздушните течения.

За разлика от ледено поле „Балкан“, което обединява две последователни години измервания, в ледник Контел тези резултати са начален репер на последващи изследвания и прогнози.

Ледник Джонсън (Johnson):

Ледникът „Johnson“ беше изследван при две цепнатини: JD1 и JD2 (Фиг. 26)



Фигура 26. Разположение на сензорите в цепнатините JD1 и JD2.

Пукнатина JD1 се намира близо до предната част на ледника, в зоната на аблация, с координати ($62^{\circ}39'47.83''$ S и $60^{\circ}21'45.71''$ W), като в него са поставени температурни сензори и анемометър. Най-дълбоко разположеният сензор е на дълбочина 15 метра.

Относно данните от анемометъра:
От 270° до 360° и от 0° до 90° посоката се кодира като „Надолу“ (**Down**).
От 90° до 270° се кодира като „Нагоре“ (**Up**).
С други думи, референтната ос се приема за насочена право надолу.

Когато измерената скорост е много ниска – под $0,04$ m/s – посоката не се записва и се отбелязва като „Няма“ (**No**).
Следователно, посоката има три възможни стойности: „Up“, „Down“ и „No“.

След това:
За всеки ден сумираме всички скорости на въздушния поток, записани като „Нагоре“, и всички, записани като „Надолу“.
Така за всеки ден получаваме:
● Общия обем въздух, преместен нагоре
● Общия обем въздух, преместен надолу
● Разликата (**diff**) между тях

Корелация на разликата (**diff**) с броя на слънчевите петна и външната температура е представена в Таблица 2:

Таблица 2. Корелационен коефициент между разликата в движението на въздуха (**diff**) и броя на слънчевите петна.

Независима променлива	Дни на измерване	Корелационен коефициент	P-value (Significance Level)
Sun Spots	18	-0.23	0.36
Outside Temperature	18	-0.14	0.59

Корелационният анализ (Таблица 2) показва отрицателна корелация – което означава, че по време на периоди на висока слънчева активност разликата (**diff**) е отрицателна. Това предполага, че при повишаване на слънчевата активност въздушните маси са се движили по-интензивно надолу.

Пукнатина **JD2** се намира на границата между зоната на натрупване и зоната на аблация с координати (62°39'53.09" S и 60°21'37.79" W). В него беше монтиран един сензор на дълбочина 12 метра, заедно с въже за измерване на разстоянието между стените на цепнатината.

От 20 януари до 25 януари 2025 г. в потока, изтичащ от периферията на ледника, беше поставен сензор за температура на водата. Той регистрира постоянна температура от 0,05°C.

- В цепнатина GD1 бяха монтирани анемометър и три сензора за температура на въздуха. Данните от анемометъра, корелирани със слънчевата активност и външните температури, са представени в Таблица 2. Сензорите, предназначени да откриват температурния градиент, не показаха зона с отрицателни температури. Всички измерени температури бяха положителни. Това явление вероятно се дължи на близостта на цепнатината до края на ледника, в зоната на най-бързо топене и движение, където няма стабилност и ледникът губи маса най-интензивно.

- В цепнатина GD2, в периода от 1 февруари до 10 февруари 2025 г., беше поставен сензор за температура на въздуха на дълбочина 10 метра. Той отчете стабилна температура около 0°C, което предполага, че се намира на границата на зоната с постоянни отрицателни температури. Данните от този сензор също бяха корелирани със слънчевата активност и са представени в Таблица 3. Корелациите са статистически значими. Тези значими корелации са отрицателни, както при ледника Контел, което означава, че по-ниските температури в цепнатината са свързани с по-голям брой слънчеви петна, също както при Контел.

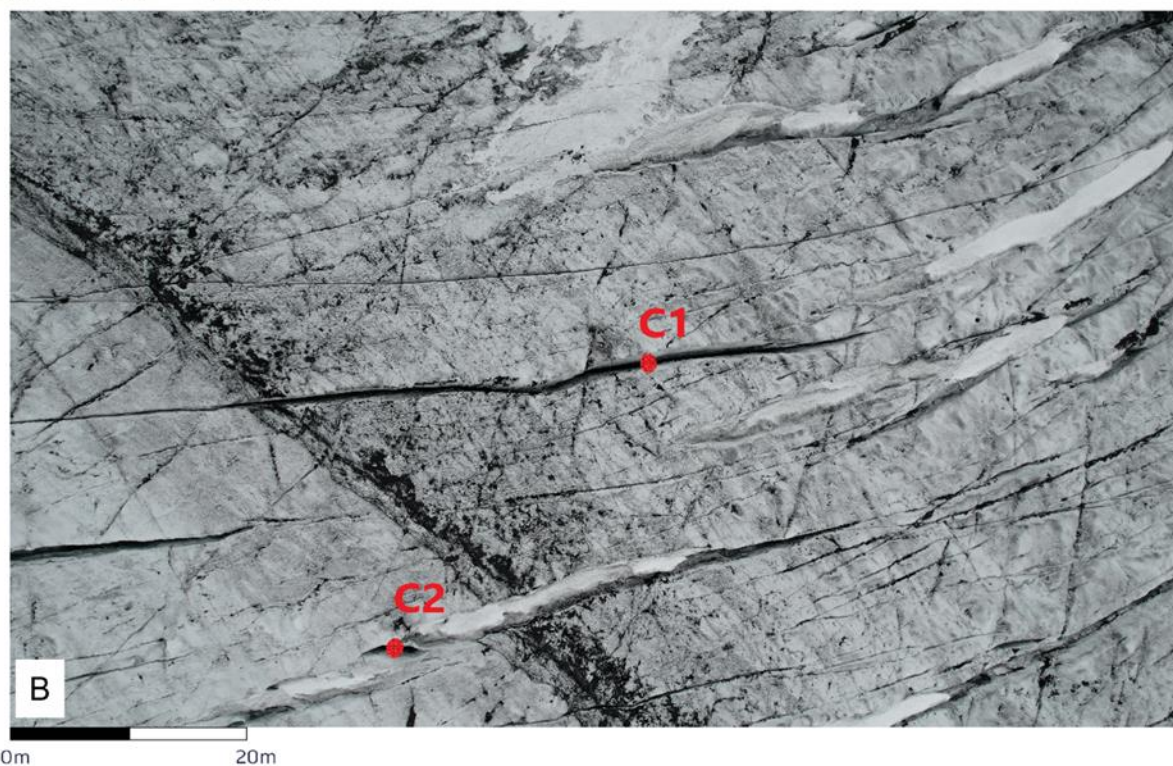
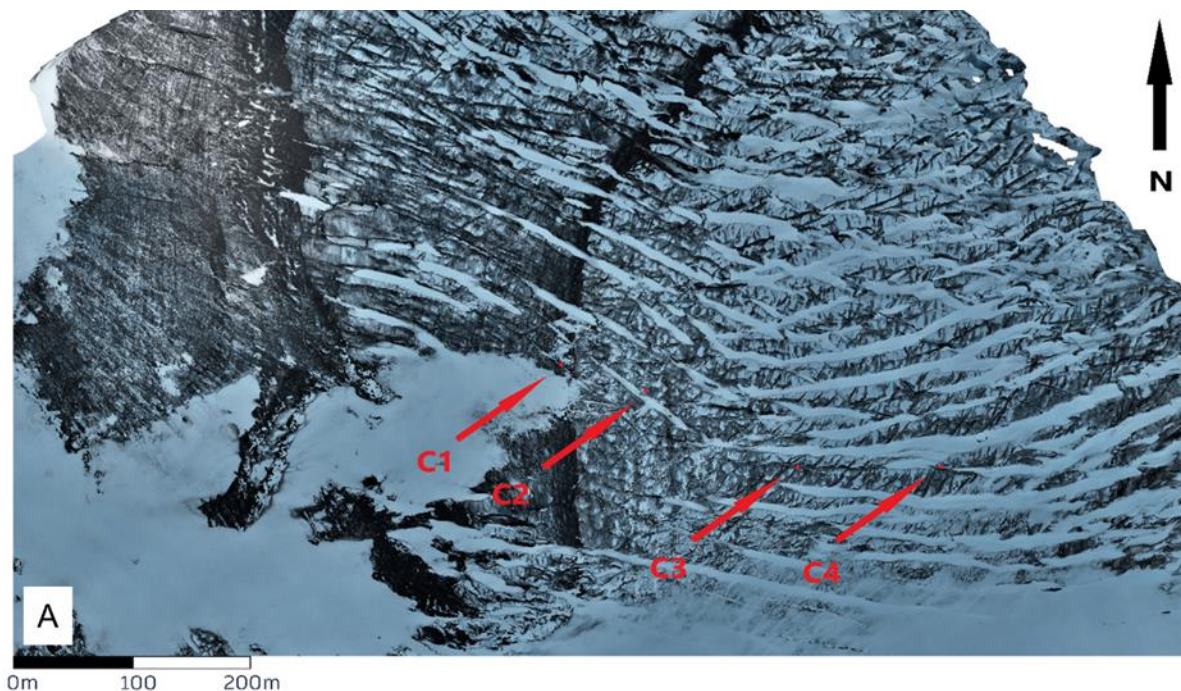
Таблица 3. Представяне на корелацията между температурите в JD2 и броя на слънчевите петна.

Независима променлива	Брой дни	Correlation Coefficient	P-value (Significance Level)
Outside	37	0.16	0.35
JD2	9	-0.79	0.01

Температура на повърхностни води: В оттока на ледника Джонсън поставихме сензор за температура на водата за 6 дни – от 20.01.2025 до 25.01.2025. Средната температура там е **0.062°C**.

Снежно поле „Балкан“- резултати от експедиция 2024г. и експедиция 2025г.

По време на първоначалното теренно изследване бе установено, че към 15.01.2024 г. само четири пукнатини (C1-24, C2-24, C3-24 и C4-24) в края на аблационната зона са отворени (Фиг. 27А). Те са локализирани на границата между зоната на акумулация и зоната на аблация, като основната пукнатина пресича ширината на ледника до неговата средна част. При спускане в тях се наблюдава, че пукнатините в централната част на ледника нямат ясно изразено дъно, като тяхната дълбочина вероятно е съпоставима с дебелината на ледника, която в този участък достига около 80 m (входната зона е разположена на 102 m н.в.).



Фигура 27. Разположение на изследваните пукнатини 2024г. А – Всички пукнатини с инсталирани температурни сензори. UAV изображение, генерирано от 1630 отделни снимки, заснети от височина 200 m над повърхността на ледника. В – Позиции на сензорите в Пукнатина 1 и Пукнатина 2. UAV изображение, заснето от височина 50 m.

Пукнатина 1 (C1-24) и Пукнатина 2 (C2-24) са разположени в периферната част на ледника (Фиг. 27В) и имат следните характеристики:

C1-24 – най-периферната пукнатина, намираща се в зоната на най-интензивно топене на ледника. Разположена е успоредно на C2-24. В началото на изследването (15.01.2024 г.) е регистрирано малко отваряне с приблизителни размери около 3 m. Общата дължина е около 200 m, като на дъното се наблюдава течаща вода. На входа бяха инсталирани три сензора на интервали от по 3 m. Част от повърхностните води, стичащи се по ледника, се инфилтрират в пукнатината.

C2-24 – първата проучена пукнатина, в която бяха инсталирани три сензора. Разположена е между централната и периферната част на ледника на 84 m н.в. Входът в началото на изследването е бил широк около 80 cm. Първите 9 m в дълбочина са лесно проходими, след което се наблюдава стеснение, от което се чува шум на течаща вода.

Другите две пукнатини – C3-24 и C4-24 – се намират в централната част на ледника (Фиг. 27А). Техните физически характеристики (ширина и дължина), както и описание на местата за измервания са представени по-долу:

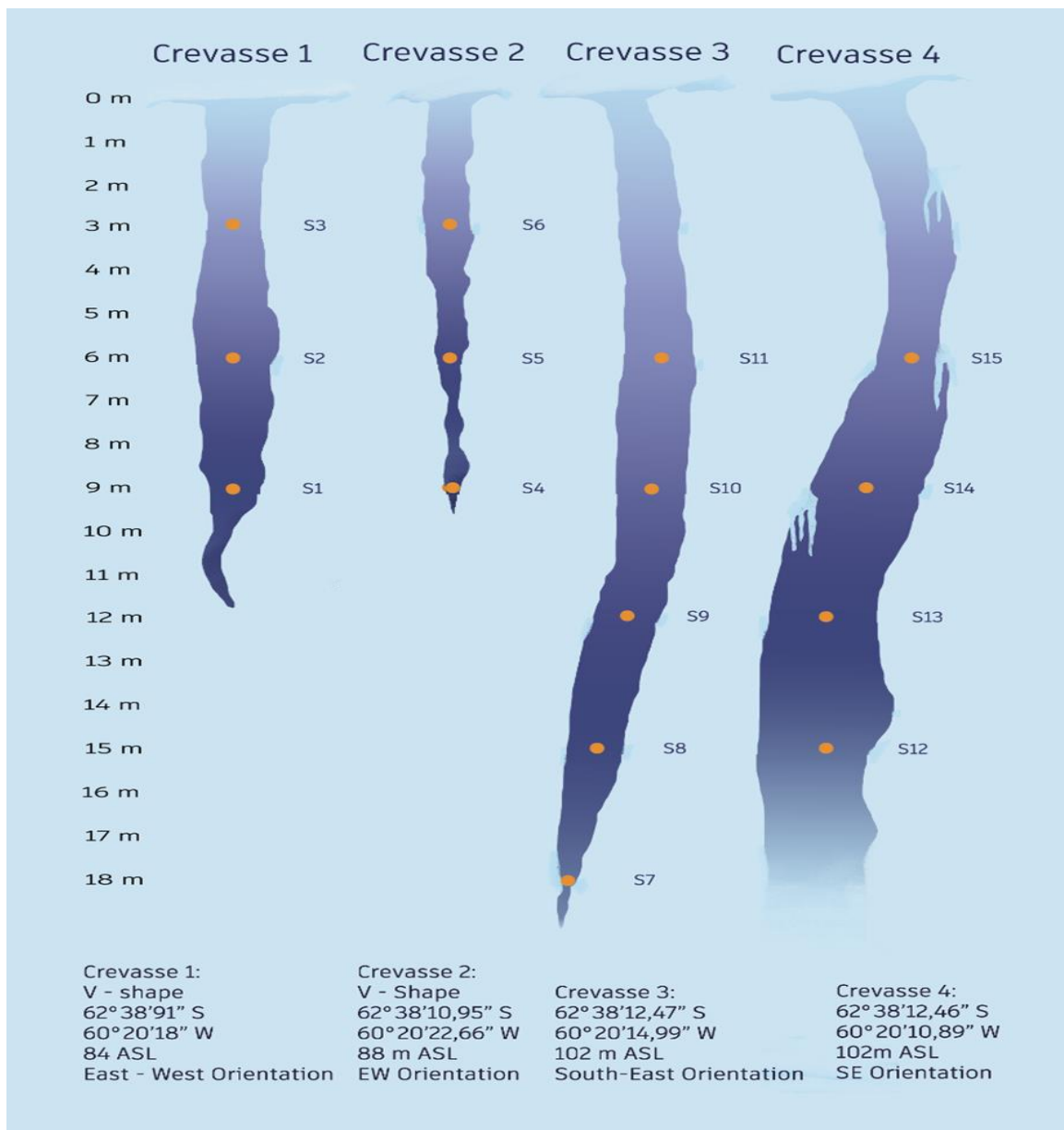
C3-24 – ширина 0.7 m, дължина около 40 m (Фиг. 27А). Къса, но дълбока пукнатина, свързваща две успоредни основни пукнатини. Отворена е по цялата си дължина. В C3-24 бяха поставени пет сензора (TINYTAG-4500) за регистриране на температурата на въздуха. Сензорите са прикрепени към въжета през интервали от 3 m, като първият е разположен на 3 m от входа. Общата достигната дълбочина на измерване е 18 m. Интервалът на запис на данните е 30 минути. В C3-24 на дълбочина 6 m под повърхността беше поставен и ултразвуков анемометър WindSonic с логер за данни.

C4-24 – ширина 1.5 m, дължина около 400 m. Затворена е със снежна „шапка“ по цялата си дължина, с изключение на малко отворено пространство с дължина 4–5 m, където бяха разположени сензорите. Четири сензора (TINYTAG-4500) са позиционирани през 3 m, като най-близкият до повърхността е на 6 m (поради по-голямата ширина на входа), а най-дълбокият – на 15 m. Интервалът на запис на данните е също 30 минути. До края на астрономическото лято пукнатината се беше разширила достатъчно, за да достигнем в дълбочина приблизително 40 m, откъдето се откри гледка към равната и блестящо скално легло на ледника под нас.



Фигура 27. Местоположение на изследваните обекти през 2024г.: А – Начало на пукнатина С3-24; сините стрелки показват снежните тапи на две успоредни и големи пукнатини, които обаче са свързани чрез С3-24. В – Подготовка за спускане в С1-24. С – Подготовка за спускане в С4-24. D – Сензори в С4-24.

Чрез използването на GPS, ролетка и компас бе изготвена подробна карта на пукнатините, очертаваща техните входове, надморски височини и обозначаваща позициите на сензорите TINUTAG (жълти точки) (Фиг.28).



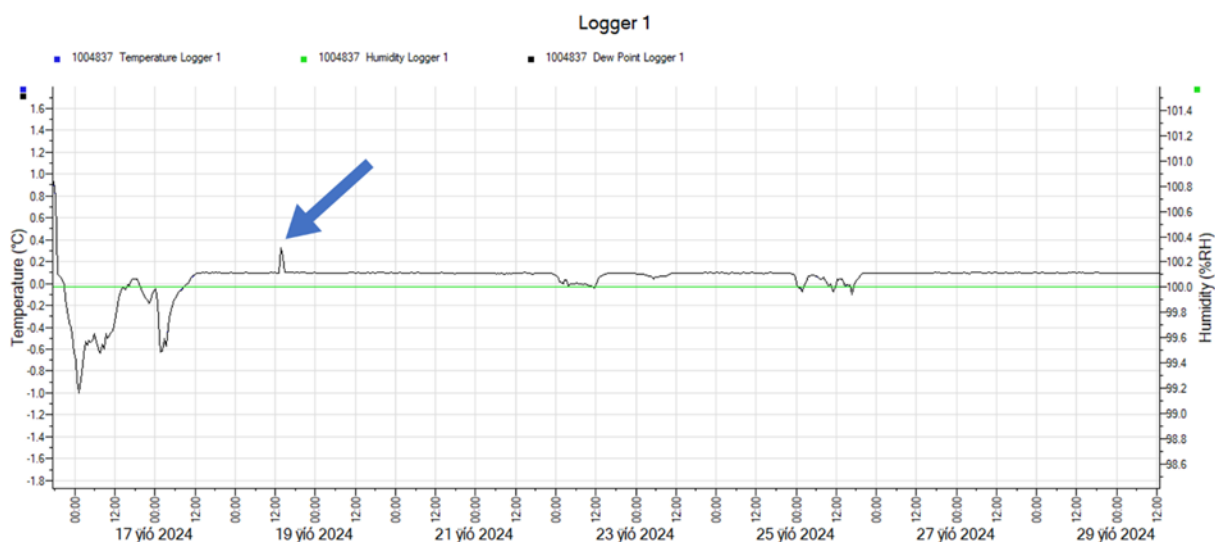
Фигура 28 . Схема на пукнатините със сензори, координати и ориентация.

Допълнително, всеки ден от измерванията беше придружен от ръчно воден дневник с описание на метеорологичните условия и данни за скоростта на вятъра.

Определяне на движението на слънцето около изследвания ледник.

По време на измерванията слънчевата светлина може да прониква в пукнатините и да влияе върху работата на сензорите. Целта е да бъде оценено това въздействие. Тази информация позволява да бъдат елиминирани смущенията в температурните измервания. Поради тази причина използвахме лицензираният софтуер **PVSyst** за определяне на пътя на Слънцето (азимут и височина) около ледника и за проследяване на промените в слънчевата траектория през първите две седмици на измерванията.

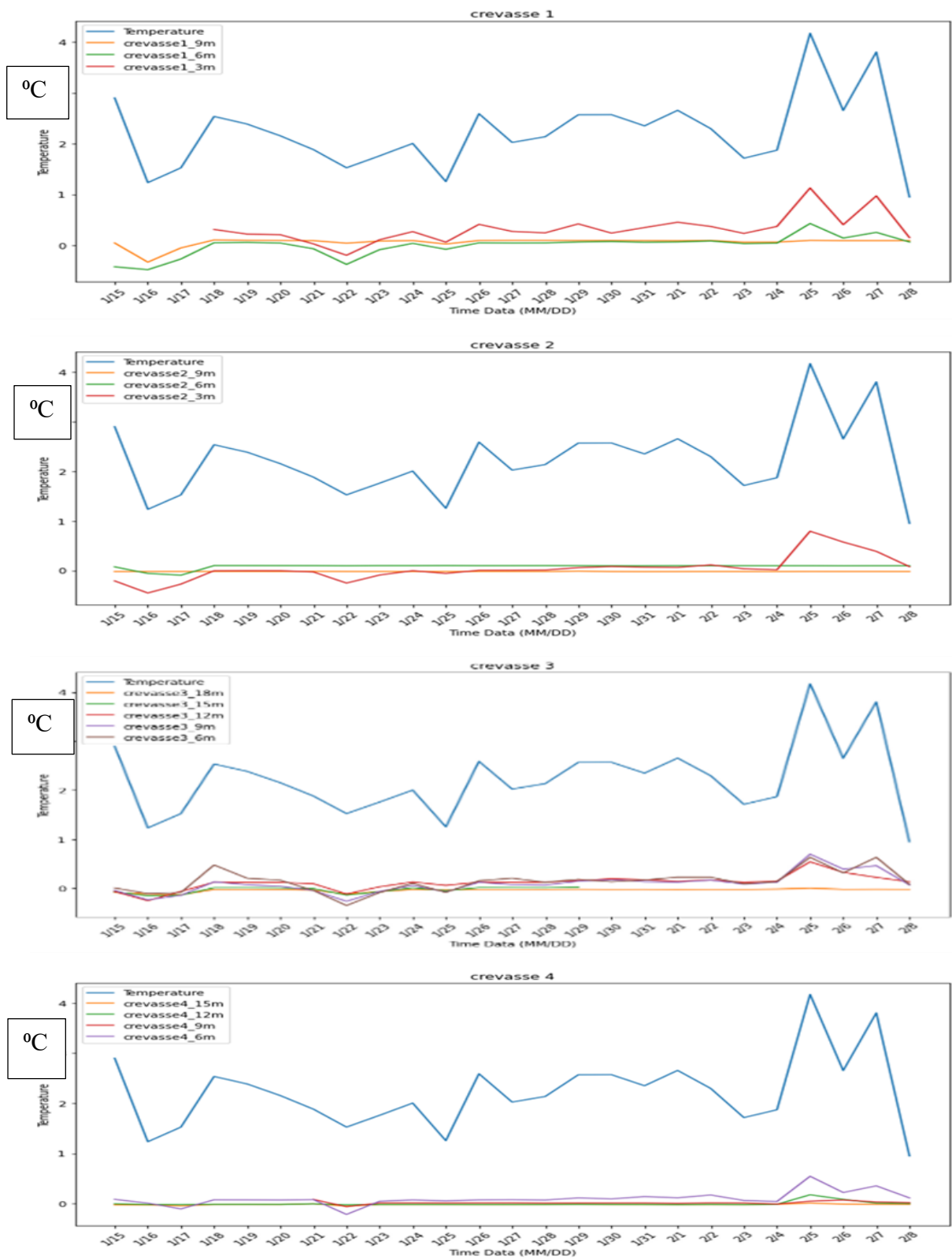
В резултат на тези измервания беше установено, че в началото на експеримента, около обедните часове, слънчевата светлина прониква дълбоко в пукнатината C1-24 и оказва съществено влияние (Фиг. 29). Поради липсата на термична инерция в леда и в материала на сензорите, не се наблюдават съществени промени в отчетените стойности скоро след облъчването с директна слънчева радиация.



Фигура 29. Зависимост на температурата от движението на слънцето около ледника за периода 16.1.2024 до 29.1.2024. Синята стрелка показва смущение на измерената температура от попадане на директна слънчевата светлина върху сензора.

Това наложи леко коригиране на позициите на най-високо разположените сензори, за да се гарантира, че ще останат ненагreti от слънцето през целия период на измерванията.

Определяне на температурния градиент и зоната на постоянни температури в 4-рите изследвани пукнатини през 2024 г.



Фигура 30. Зависимост на температурата на въздуха на дълбочина 6, 9, 12 и 15 метра за четирите пукнатини от времето. представя графики на регистрираните температури във

всяка от пукнатините, заедно с външната температура. Ясно се вижда тенденцията вътрешните температури да намаляват с дълбочината и да стават по-стабилни. Синята линия показва външната температура за период от три седмици, а останалите линии отразяват вътрешните температури на всеки 3 m. Очевидно е, че Пукнатина 1, която е по-плитка и разположена в периферията на ледника, реагира по-силно на външните изменения.

Определяне на зоната на постоянни температури в изследваните през 2024 г. Пукнатини - репер за последващи изследвания

За да бъде определена зоната на постоянни температури, е необходимо да се определи дисперсията (вариацията) на температурите и да се определи дълбочината на проникване на топлината от повърхността.

Във всяка от пукнатините дисперсията намалява с увеличаване на дълбочината, което означава, че температурите стават по-устойчиви в по-дълбоките слоеве. Таблица 6 представя температурната дисперсия за всеки от сензорите. Резултатите показват, че на дълбочини над 9 m в централните пукнатини дисперсията клони към нула и следователно се наблюдава температурна стабилност.

Таблица 6 Измерена статистическа дисперсия на температурата за всеки от сензорите в отделните пукнатини

Номер на пукнатина и дълбочина на сензора (m)	Статистическа дисперсия
crevasse1_9m	0.016464
crevasse1_6m	0.067207
crevasse1_3m	0.179162
crevasse2_9m	0.000065
crevasse2_6m	0.009135
crevasse2_3m	0.095654
crevasse3_18m	0.002996
crevasse3_15m	0.010283
crevasse3_12m	0.036019
crevasse3_9m	0.072153
crevasse3_6m	0.090527

crevasse4_15m	0.000586
crevasse4_12m	0.003642
crevasse4_9m	0.003087
crevasse4_6m	0.042197

На второ място беше установена средната температура в зоната на постоянни температури (Табл. 7). Определянето на точката на постоянна температура се различава в периферията на ледника и в неговата централна част. Ако се избере определен праг на дисперсия, например 0.01, може да се заключи, че в различните пукнатини тази точка се намира на различна дълбочина: приблизително 10 m в пукнатина 1; около 8–9 m в пукнатина 2; около 15 m в пукнатина 3; около 12 m в пукнатина 4.

Таблица 7. Изчислена средна температура за всеки сензор в пукнатините и за повърхностните сензори

Номер на пукнатина и дълбочина (m) на сензор	Средна температура в пукнатината, °C:
crevasse1_9m	0.063
crevasse1_6m	0.008
crevasse1_3m	0.325
crevasse2_9m	-0.020
crevasse2_6m	0.081
crevasse2_3m	0.042
crevasse3_18m	-0.035
crevasse3_15m	-0.032
crevasse3_12m	0.123
crevasse3_9m	0.098
crevasse3_6m	0.148
crevasse4_15m	-0.020
crevasse4_12m	-0.003
crevasse4_9m	0.015
crevasse4_6m	0.097
Outside sensors:	

Външна температура	2.225 °C
Относителна влажност	79.591 %
Точка на оросяване	-1.022 °C
Атм. Налягане	983.837 mbar

Зависимости между повърхностните метеорологични параметри и температурата на въздуха в пукнатините

Забелязва се, че за всяка от пукнатините корелацията с външната температура намалява с увеличаване на дълбочината (Табл. 8). За дълбочини под избраните условни точки на постоянна температура (с вариация под 0.01), корелациите с външната температура са пониски от 0.4. Изключение представлява Пукнатина 3, при която корелациите с външната температура остават сравнително високи дори на по-големи дълбочини. Както бе отбелязано по-рано, зоната на постоянна температура там се простира значително по-дълбоко.

Таблица 8. Корелации (в Пиърсън) между външните метеорологични параметри и температурата на въздуха в пукнатините 2024г.

Номер на пукнатината и дълбочина (m) на сензора	Външна температура °C	Относителна влажност RH%	Точка на оросяване °C
crevasse1_9m	0.320	0.296	0.424
crevasse1_6m	0.639	0.446	0.728
crevasse1_3m	0.832	0.183	0.649
crevasse2_9m	0.064	-0.013	0.023
crevasse2_6m	0.274	0.188	0.307
crevasse2_3m	0.625	0.409	0.683
crevasse3_18m	0.466	0.402	0.594
crevasse3_15m	0.533	0.460	0.662
crevasse3_12m	0.623	0.403	0.683
crevasse3_9m	0.709	0.403	0.727
crevasse3_6m	0.790	0.373	0.744
crevasse4_15m	0.385	0.161	0.344
crevasse4_12m	0.393	0.130	0.322

crevasse4_9m	0.303	0.173	0.315
crevasse4_6m	0.697	0.273	0.607

Ролята на външния вятър за изменението на дълбочината на зоната на постоянни температури

Бяха подбрани дните със значителен вятър: 16, 17, 23, 24, 25 и 31 януари 2024г., както и 5 и 6 февруари. Данните от тези дни бяха групирани в един масив („с вятър“), а останалите – в друг („без вятър“) (Табл. 9). Анализите, описани по-горе, бяха повторени поотделно за двете групи.

Най-напред бяха изчислени дисперсиите на температурите отделно за ветровитите и спокойните дни. Данните са представени в таблицата по-долу и ясно показват, че **стойностите на дисперсията са по-малки в спокойни дни (т.е. температурите са по-устойчиви)**. Също така се вижда, че приетото условие за зоната на постоянни температури (дисперсия под 0.01) е по-плитка в дни с вятър и по-дълбока в спокойни дни. Това означава, че в дни с вятър зоната на постоянна температура се измества по-близо до повърхността. Тези резултати показват значимата роля на вятъра като фактор, променящ вертикалния температурен профил в пукнатините.

Таблица 9. Сравнение на температурната статистическа дисперсия през ветровити и спокойни дни

Номер на пукнатината и дълбочина (m) на сензора	Дни с вятър Над 40 км/ч	Дни без вятър
crevasse1_9m	0.035717	0.004948
crevasse1_6m	0.121373	0.038901
crevasse1_3m	0.204139	0.167434
crevasse2_9m	0.000004	0.000096
crevasse2_6m	0.026022	0.000025
crevasse2_3m	0.221753	0.031819
crevasse3_18m	0.006056	0.001311
crevasse3_15m	0.015968	0.005292
crevasse3_12m	0.074712	0.016559
crevasse3_9m	0.117571	0.049395

crevasse3_6m	0.098375	0.085661
crevasse4_15m	0.000555	0.000603
crevasse4_12m	0.009272	0.000422
crevasse4_9m	0.000824	0.004103
crevasse4_6m	0.056004	0.034821

Таблица 10 представя коефициентите на корелация между температурите, измерени от сензорите в пукнатините и външната температура, като корелациите са изчислени отделно за ветровитите дни (първа колона) и за останалите дни (втора колона). Ясно се вижда, че всички корелации са по-високи през ветровитите дни, което показва по-силното влияние на външната температура. Освен това корелациите над 0.4 се наблюдават на по-плитки дълбочини през ветровитите дни. Тези резултати подчертават ролята на вятъра като механизъм за пренос на топлина при повърхностни температурни флуктуации в дълбочина на пукнатината.

Таблица 10. Коефициенти на корелация между външната температура и температурите, измерени от сензорите в пукнатините за ветровити дни и дни без вятър

Номер на пукнатината и дълбочина (m) на сензора	Дни с вятър Над 40 км/ч	Дни без вятър
crevasse1_9m	0.455	0.179
crevasse1_6m	0.781	0.530
crevasse1_3m	0.910	0.795
crevasse2_9m	0.024	0.077
crevasse2_6m	0.424	0.134
crevasse2_3m	0.751	0.599
crevasse3_18m	0.586	0.368
crevasse3_15m	0.602	0.416
crevasse3_12m	0.799	0.486
crevasse3_9m	0.833	0.623
crevasse3_6m	0.892	0.727
crevasse4_15m	0.674	0.233
crevasse4_12m	0.618	0.260
crevasse4_9m	0.359	0.312

crevasse4_6m	0.833	0.621
--------------	-------	-------

През месеците януари и февруари 2024 г., успешно бяха дефинирани и измерени метеорологични параметри в пукнатините, включително температурен градиент, температурна стабилност в дълбочина и средна температура. Това изследване осигури отправна точка, спрямо която могат да се сравняват бъдещи промени в ледника.

Идентифицирането на зона на постоянни температури на въздуха в ледника и определянето на дълбочината на тази зона въвежда концепцията за микроклимат на дренажните системи на ледниците. Подобно изследване досега не е провеждано в Антарктика и липсва информация дали тези параметри се изменят в отговор на слънчева активност, сезонни вариации, антропогенно въздействие и др. Движенията на въздуха в пукнатините показват, че ледникът притежава циркулационен въздушен ритъм, зависим от външните изменения. За да бъдат изяснени механизмите на този процес, в бъдеще следва да се инсталират допълнителни анемометри и да се включат параметри, които досега не са били обект на изследване (например приливите в Южния океан и температурните колебания на океанската вода).

Проучвания на ледено поле „Балкан“ през 2025 г.

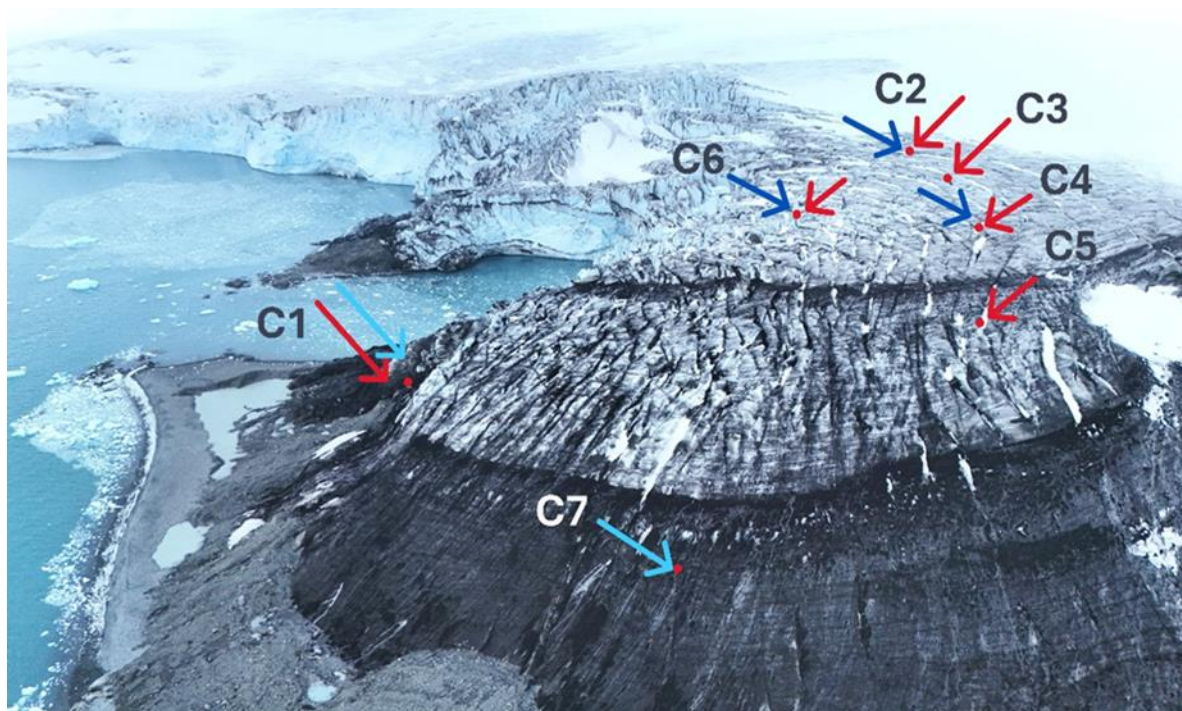
Ледено поле „Балкан“ представлява особен интерес, тъй като беше основен изследователски обект година по-рано – по време на предходната 32-ра Българска антарктическа експедиция (Parov, 2024). Именно там за първи път беше идентифицирана зоната на постоянно отрицателни температури и отрицателната корелация със слънчевата активност. Това бележи и началото на изследванията върху посоката и интензивността на въздушните потоци, циркулиращи в пукнатините.

През изминалата година, при условия на засилваща се слънчева активност във връзка с приближаването на слънчевия максимум от 11-годишния цикъл, бе наблюдавано ясно разширение на аблационната зона на ледника с приблизително 50 m, потъване надолу с 8 m на стабилната зона на постоянно отрицателни температури и 2- до 3-кратно разширяване на пукнатините във вече проучени участъци на ледника. В три от изследваните пукнатини бяха установени езера в дъното им – явление, което не бе наблюдавано през предходната година. В ледено поле „Балкан“, през 2025 г. след проведени теренни проучвания, започнали на 29.12.2024 г., беше установено, че четири цепнатини (C3-25, C2-25, C4-25, C5-25) и една подледникова пещера (C1-25) в края на зоната на аблация (Фиг. 31) са отворени и подходящи за инсталиране на измервателно оборудване. Тези обекти се намират на границата между зоната на натрупване и зоната на аблация, като основната цепнатина пресича ледника чак до средната му част.

Чрез използване на алпийски техники за спускане в цепнатините беше установено, че тяхната дълбочина е съпоставима с дебелината на ледника, която в този район е около 100 метра (входната зона е разположена на 102 метра надморска височина).

Описание на местата за поставяне на сензорите:

- **C1-25** – пещера, разположена на контактната зона между леда на ледника и скалната му основа. Използвахме пещерата за провеждане на измервания на температурата на подледниковата река и температурата на въздуха.
- **C2-25** – тази цепнатина беше огромна и дълбока. За съжаление разполагаме с данни от нея само за 48 часа, преди снежния капак да се срути заедно с част от стената, отнасяйки 5 от нашите сензори. Достигнатата дълбочина за по-дълбокия сензор беше 25 метра.
- **C3-25** – временно място за един анемометър за период от 3 дни.
- **C4-25** – сензори за температура на въздуха и анемометър за период от 20 дни, на дълбочина 13 метра.
- **C5-25** – сензор за температура на въздуха на дълбочина 10 метра.
- **C7-25** – сензор за измерване температурата на стопилната вода, изтичаща от периферията на ледника.
- **C6-25** – красива и дълбока цепнатина със сензори за температура на въздуха на дълбочина 21 метра и анемометър.



Фигура 31. Места за разполагане на сензорите през 2025г.. Червените стрелки показват позицията на сензорите за температура на въздуха, а светлосините стрелки при C7-25 и

C1-25 обозначават сензорите за температура на подледниковата вода. Тъмносините означават позицията на анемометрите.

Резултати за пещера C1-25

Пещерата се намира във фронталната част на ледника (62°3803.21''S, 60°2016.42''W), което осигурява бърз достъп до контактната зона между скалния масив и леда. Приблизителните размери на галерията са около 1 m ширина и 2 m височина. След десетия метър дължина формата на галерията преминава в тип „тунел-пещ“, с височина около 50 cm, следвайки течението на подледниковата река.

Инсталирахме сензор за температура на водата, който регистрира устойчива и постоянна температура от 0.03°C, както и сензор за температура на въздуха. Температурата на въздуха се задържа около 0.1°C с минимални колебания.

Макар че периодът на наблюдение (15.01.2025 – 19.01.2025) е твърде кратък за значими изводи, входът на пещерата представляваше сериозна опасност поради бързото топене на леда. Въпреки това, петте дни измервания са достатъчни, за да се установи корелация между температурата и слънчевата активност. Корелацията е слаба, но отрицателна, което е в съответствие с наблюденията от други ледници (Таблица 11).

Таблица 11. Корелация между температурите в пещерата и броя на слънчевите петна

Променлива	Брой дни	P- корелационен коеф.	P-value (Ниво на значимост)
Температура в пещерата	5	-0.39	0.52

Освен това, от гл.ас. Йорданка Донкова, бяха взети седиментни проби от ледената пещера. Също и от фронтните части, които вече са експонирани в непосредствена близост до бреговата линия, както и от пирокластитите и скалните късове от повърхността на ледника. Пробите ще бъдат анализирани чрез ситов и минераложки анализ за да се определи минералният им състав, което от своя страна ще даде информация за скалите, служещи за основа на Снежно поле Балкан.

Резултати за пукнатина C2-25:

Местоположението на точката е 62°3812.52''S и 60°2003.16''W, 107 m н.в.

За съжаление, поради срутване на тавана и част от стените на пукнатината, загубихме 5 от нашите сензори само 26 часа след началото на измерванията. Най-долният сензор беше позициониран на дълбочина -21 m. За измерените часове, данните показаха устойчива температура от 0°C под 18-ия метър.

Интересно е, че на същите географски координати през предходната година измерихме средна ширина на пукнатината 1.8–2 m, докато тази година ширината достигна до 6 m. За установяване на размерите използвахме софтуера на дрона DJI Phantom 4 Pro (Фиг. 32).

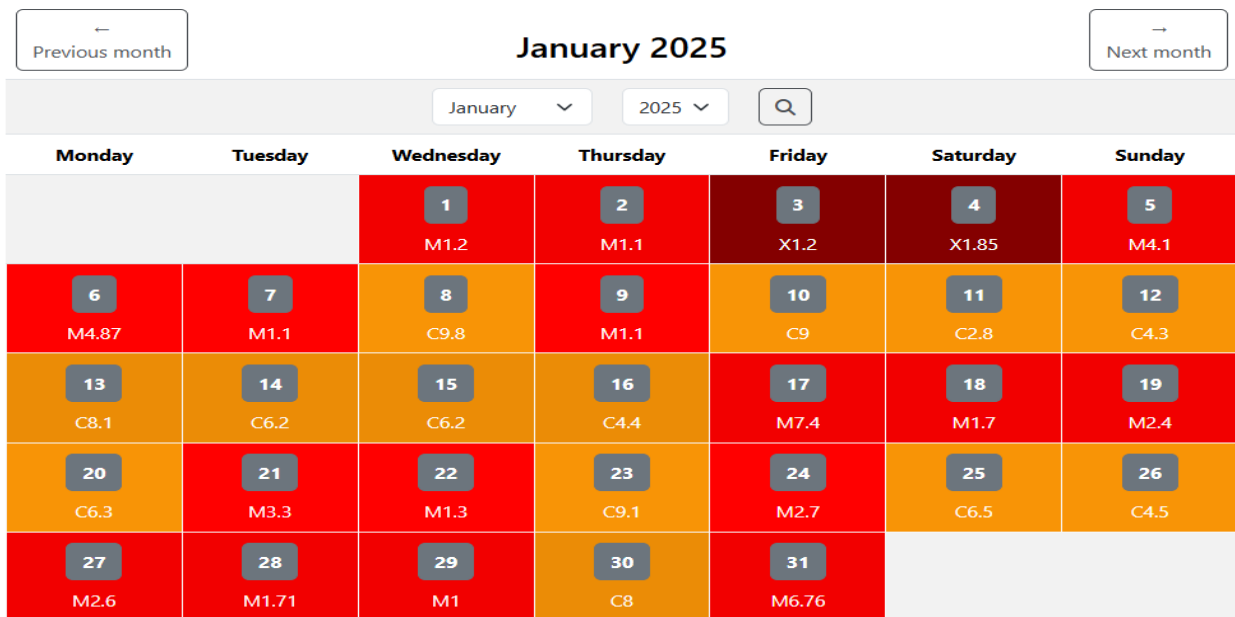


Фигура 32. Червената стрелка показва позицията на сензорите в пукнатина С2

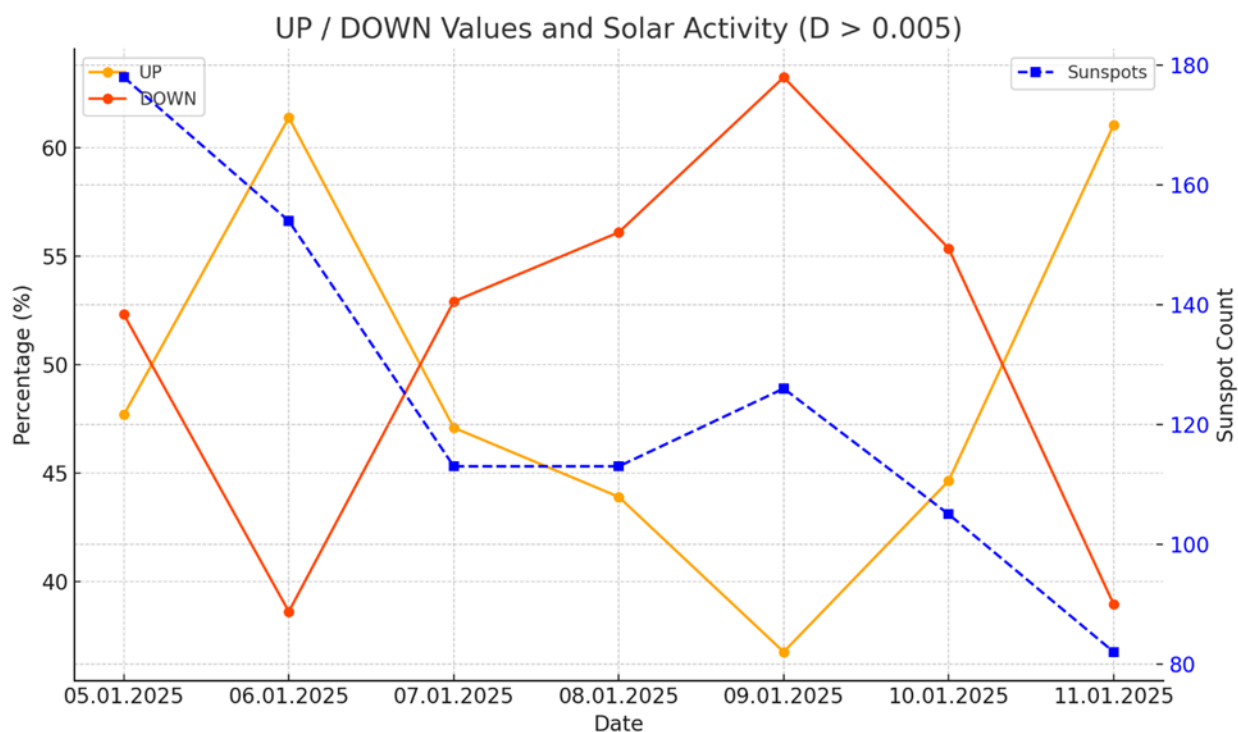
Извършихме измервания и използвахме софтуера на дрона, за да определим както площта на покривната част на пукнатината, така и нейната средна ширина. Това ни позволи да изчислим, че в рамките на една година пукнатините в изследваната зона са се разширили. През предходната година на същата координатна зона максималната ширина на пукнатината беше 2 метра, докато в средата на януари 2025 средната ѝ стойност е 5 метра.

Резултати за пукнатина С3-25:

В тази пукнатина беше разположен анемометър за период от една седмица. Графичният анализ на данните показва потенциална корелация между низходящото движение (червена линия) на въздушните маси и повишената слънчева активност (Фиг.41). Отклонението, наблюдавано в началото на графиката, може да се дължи на силна геомагнитна буря, вероятно предизвикана от слънчево изригване от клас X, регистрирано на 4 януари 2025 г.(Фиг. 33)



Фигура 33: Слънчева активност през януари 2025г. На 3 и 4 януари се забелязват силни слънчеви изригвания от клас X.



Фигура 34 Движение на въздушните маси във връзка с повишена слънчева активност в СЗ. (Оранжевата линия показва възходящото движение на въздушния поток, червената линия показва низходящото движение, а синята линия – броя на слънчевите петна).

Резултати за пукнатина C4-25:

Позицията на сензорите е $62^{\circ}3812.19''S$, $60^{\circ}2015.67''W$. В Таблица 12 е представена корелацията между разликата в количеството въздух, движещ се нагоре или надолу в пукнатината и слънчевата активност. За да бъде изчислена разликата, за всеки ден изваждаме количеството въздух, движещ се надолу, от общото количество, движещо се нагоре. Наблюдава се отрицателна корелация. Това означава, че през периоди на висока слънчева активност разликата (diff) има тенденция да бъде отрицателна - с други думи, повече въздух се е движил надолу. Освен това се установява връзка между низходящото движение на въздушните маси и нарастването на слънчевата активност. Отрицателната корелация между количеството въздух, движещ се нагоре и надолу в пукнатината и промяната в броя на слънчевите петна и интензитета на 10.7 см. показва, че въздухът над ледника се охлажда през периоди на засилена слънчева активност и впоследствие „потъва“ в пукнатините.

Таблица 12. Корелация между разликата в количеството въздух (diff), движещ се нагоре и надолу в пукнатина C4 и броя на слънчевите петна.

Променлива	Брой дни	R – корелационен коеф.	R-стойност (Ниво на значимост)
Sun Spots	19	-0.51	0.03
Outside Temperature	19	-0.1	0.68

Резултати за пукнатина C5-25:

Местоположението на сензорите върху ледника е $62^{\circ}3812.04''S$, $60^{\circ}2017.71''W$. Използвахме тази периферна пукнатина, за да сравним промяната в средните температури на дълбочина 10 m с измервания, извършени 10 месеца по-рано на същото място. По време на експедицията през 2024 г. средната температура на 10 m дълбочина беше

$-0.0182^{\circ}C$, докато настоящите изчисления показват $0.0163^{\circ}C$, което е положителна стойност и фактор за ускорено топене.

Резултати за пукнатина C6-25:

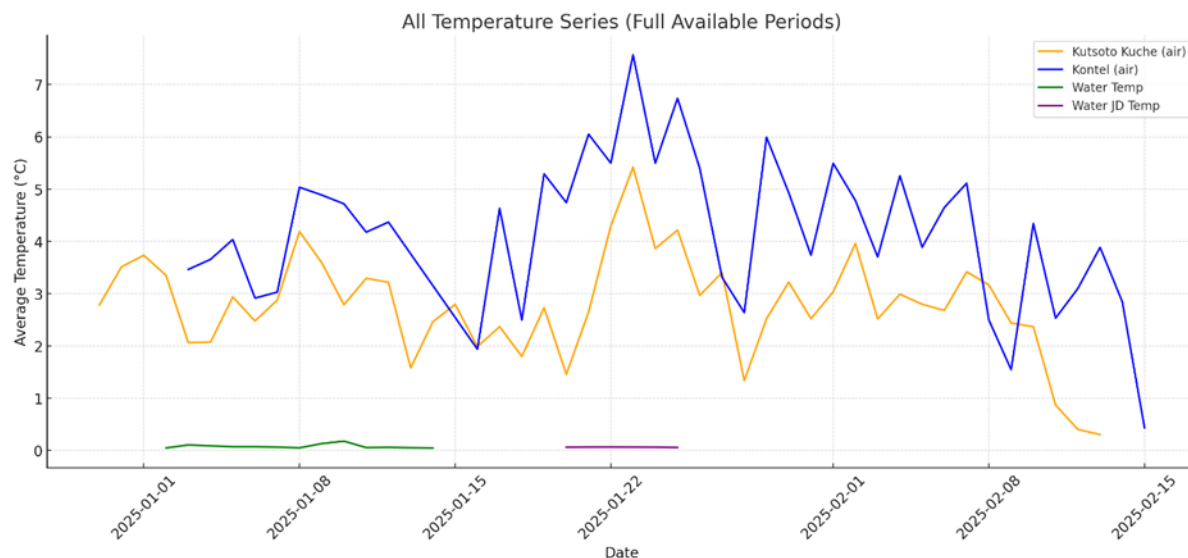
Местоположението на сензорите е $62^{\circ}3810.89''S$, $60^{\circ}2011.77''W$. Това е много красива пукнатина, разположена близо до ръба на ледника (Фиг. 13). Вътре наблюдавахме множество ледени сталактити и други вторични образувания. Достигнатата дълбочина беше **30 m**, като сензор беше поставен на дълбочина **22 m**. На тази дълбочина измерената температура беше постоянна – $-0.02^{\circ}C$. Тази стойност, в сравнение с измерванията на същото място преди 10 месеца, е същата, но зоната на устойчиво отрицателни температури е „потънала“ с 10 m по-надолу.

Резултати от изследването на външните води и външните температури: C7-25

През януари 2025 г. бяха събрани температурни данни от четири различни места: два логера за измерване на температура на въздуха, разположени на различни височини — единият под Българската антарктическа база при фургона, наречен „Куцо куче“, а другият - в горната част на ледника Контел — както и два сензора за измерване на температурата на водата, изтичаща директно от ледника: Сензор „Water Temp“, следящ оттока от периферията на Балкан ледено поле, и сензор „Water JD Temp“, поставен при оттока на водите на ледника Джонсън. Целта на изследването е да се анализира термичното поведение на въздуха и водата и да се изследват потенциални корелации между тях.

C7-25 е малък поток в периферията на ледника, където поставихме сензор за температура на водата. Средната температура на водите, изтичащи от периферията на ледено поле Балкан, беше измерена като 0.113°C и беше измервана за период от 12 дни – от 2.01.2025 до 14.01.2025. Оказва се, че единствено този отток от ледено поле Балкан, показва слаба реакция спрямо промените във външните температури на въздуха.

Интересен контраст се наблюдава между температурите на въздуха на морското равнище, регистрирани от сензора при базата Куцо куче, който е поставен на сенчесто и защитено от вятър място, и сензора Контел (синя линия), който е разположен в скална пукнатина на около 250 m н.в. на хребета Чаруа (Фиг. 35). Изразената топлинна инертност на околната скала, която абсорбира и съхранява слънчевата радиация, изглежда води до изкуствено завишени температурни показания въпреки по-голямата надморска височина.



Фигура 35. Изкуствено завишени температурни показания (синята линия) въпреки по-голямата надморска височина спрямо морското ниво (оранжевата линия). Дължат се на температурната инертност на скалата.

Изводи

Извод 1: Във всичките изследвани пукнатини на ледниците Контел, Джонсън и Балкан се установява отчетлив вертикален температурен градиент с намаляваща амплитуда на колебанията на всеки 3 m: вътрешните температури спадат и стават по-стабилни с дълбочината. На дълбочини над ~9-11 m дисперсията клони към нула, което определя зоната на постоянни (стабилни) температури (-0.02 °C в повечето сензори). Това прави дълбочината от 9 до 11 m ориентиран репер за проникването на топлината от повърхността в изследваните цепнатини.

Извод 2: Ултразвуковите анемометри показват променливи въздушни потоци. В повечето пукнатини има ясно изразени циклични вариации (денонощен ход), по-малко движение към обяд, повече интензивност около полунощ. Възходящите потоци се засилват при бури или валежи или силен повърхностен вятър, а низходящите потоци доминират при спокойни условия. Количествено се регистрират и значими пикове на скорост след полунощ.

Извод 3: За период от една година се наблюдава пространствена и времева изменчивост. В някои пукнатини по периферията на ледника, зоната на постоянни температури се измества нагоре при ветровити условия, докато в централните пукнатини остава по-дълбока и стабилна. За ледено поле Балкан зоната на постоянни температури, потъва до 6–10 m спрямо предишната година, докато Контел и Джонсън показват по-голяма термична стабилност. Ролята на вятъра е значима: дни със силен вятър водят до по-плитка зона на постоянни температури.

Извод 4: В изследваните пукнатини са измерени отрицателни корелации между вътрешните температури и показателите за слънчевата активност, като някои от тези резултати са статистически значими. Заключение е, че слънчевата активност и локалните метеорологични условия е възможно да имат измерима връзка и ефектът е умерен и варира от типа на пукнатините.

Извод 5: В полевата работа е докладвано успешно достигане до субледникови пространства под ледено поле Балкан, което е позволило вземане на седиментни проби. В тези участъци са наблюдавани стабилни температури над водния поток и засилено повърхностно топене. Въпреки, че няма пряко отношение към темата на дисертацията, събирането на геоложки проби допълва интердисциплинарното проучване на ледниците.

Извод 6: Анализите доказват наличие на статистически значими зависимости и устойчива отрицателна корелация между вътрешните температури в пукнатините и броя слънчеви петна. Това предполага, че въздействието е индиректно и медирано чрез промени в облачността, атмосферната циркулация, влажността и локалните метеорологични условия. Заключение е, че има връзка, но тя е сложна, не винаги линейна и зависи от локалните морфологични и метеорологични фактори.

Дискусия:

Резултатите от това изследване показват потвърждение за статистически значима и съгласувана връзка между динамиката на температурите и въздушните течения в системите от цепнатини и дренажни канали на антарктическите ледници и слънчевата активност. Въпреки морфологичните различия между изследваните обекти, включително ледниците Контел и Джонсънс и снежното поле Балкан-Перуника, всички те показват устойчива отрицателна корелация между вътрешната температура под повърхността и броя на слънчевите петна. Това предполага, че охлаждането в ледниковите цепнатини е свързано с повишената слънчева активност - откритие, което поставя под съмнение широко приетото допускане за затоплящия ефект на засиленото слънчево излъчване.

Това поведение съответства на концепцията за Антарктическата климатична аномалия (АСА), която описва обратния термодинамичен отговор на Антарктида спрямо промените в облачността в сравнение с глобалната норма. Предполага се, че основният механизъм включва модуляцията на потока от галактически космически лъчи (GCR) от слънчевата активност. При повишена слънчева активност се потиска потокът на космическите лъчи, което води до намалена нуклеация на облаци и съответно до по-слаба облачност. В условията на високо алbedo и ниска влажност на Антарктида, намалената облачност усилва излъчването на дълговълнова радиация обратно в космоса, което води до охлаждане на повърхността и усилване на кататичните (низходящи) въздушни потоци в цепнатините.

Тази динамика допълнително се подкрепя от наблюдавани глациологични промени: разширяване на зоните на топене, поява на подледникови езера и потъване на зоната на постоянно отрицателните температури.

Всички тези промени подчертават повишената чувствителност на периферните антарктически ледници както към глобалните климатични промени, така и към вариациите на слънчевата активност.

Получените резултати изтъкват значението на интегрирания климатологичен и глациологичен мониторинг за разрешаване на сложните взаимодействия между криосферата и атмосферата. Освен това те предоставят емпирична подкрепа за теоретични модели, които предполагат, че йонизацията, индуцирана от космическите лъчи, влияе върху микрофизиката на облаци и по този начин модулира регионалния енергиен баланс. Продължаването на изследванията върху тези микрофизични процеси е от критично значение за усъвършенстването на климатичните модели за полярните региони, особено при сценарии на увеличаване на промените в слънчевата активност.

Въпреки това, както е добре известно, корелацията не означава причинност. Затова остава наложително, ясно да се определят точните микрофизични механизми, чрез които космическите лъчи биха могли да влияят на облакообразуването, особено в полярни ширини, където радиационните обратни връзки се различават рязко от глобалната средна стойност.

Съществено ограничение на настоящото изследване е простотата на статистическия подход. Редовете от данни за температура, въздушен поток и слънчева активност са силно

автокорелирани във времето, но въпреки това ги анализираме с прости корелации на Пирсън, които предполагат независимост между последователните наблюдения. В допълнение, беше изчислен относително голям брой двойкови корелации за различни сензори, дълбочини и места, без да се прилагат формални корекции за множествени проверки, а кратката продължителност на времевите редове заедно с ограничените допълнителни данни ни попречи да изградим мултивариантни модели, които да контролират други релевантни атмосферни и океански фактори. В съвкупност тези фактори предполагат, че номиналните p -стойности могат да надценяват силата на статистическите доказателства и отделните корелации, особено тези в близост до прага 0.05, следва да се интерпретират с повишено внимание. Поради това нашите заключения се основават преди всичко на устойчивостта на отрицателната връзка между слънчевата активност и вътрешните температури на ледника в независими обекти и на различни дълбочини, както и на физическата правдоподобност на предложения механизъм, а не на резултатите от отделен статистически тест.

Тъй като основната цел на нашия анализ беше изследователска, използвахме стандартни корелации на Пирсън, за да количествено опишем линейните връзки между броя на слънчевите петна, външните метеорологични променливи и вътрешните температури и въздушния поток в ледниковите цепнатини. Тези анализи разглеждат почасовите стойности като независими наблюдения и не моделират изрично времевата автокорелация във времевите редове. По същия начин не приложихме формални корекции за множествено тестване между различните обекти, дълбочини и параметри и не изградихме мултивариантни модели, които да контролират допълнителни потенциално важни фактори (напр. синоптични циркулационни режими, облачност, локални ветрови полета). В резултат докладваните p -стойности следва да се разглеждат като приблизителни и ориентировъчни, а не като строги тестове за статистическа значимост, и нашата интерпретация се фокусира върху знака, относителната величина и пространствената последователност на корелациите, а не върху отделни преминавания на конвенционални прагове.

Антарктическата климатична аномалия, първоначално формулирана в статията на Хенрик Свенсмарк от 2006 г., предполага, че облачната обратна връзка в Антарктида действа противоположно на ефекта ѝ в останалата част от света. Сателитните данни от експеримента Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) подкрепят това твърдение, като показват, че температурният отговор на облачността се обръща около т.нар. „седлова точка“ при приблизително 63° южна ширина. В тази зона дори малки промени в облачността, свързани със слънчевите магнитни цикли, могат да предизвикат противоположни термични ефекти в полярните спрямо средните ширини.

В обобщение, отговорът на Антарктида към промените в слънчевата активност, изглежда уникален, нелинеен и регионално модулиран, което подчертава необходимостта от създаване на полярно-специфични климатични модели и от по-задълбочено изследване на връзката между слънчевата активност, космическите лъчи, облаците и климата.

Публикация на Свенсмарк от 1997 г. и представените в нея резултати бяха подложени на критика и оценени като напълно некоректни от Торбен Стокфлет Йоргенсен и Аксел Валое Хансен през 2000 г. Въпросният коментар датира от 1997 г., като оттогава в областта е постигнат съществен напредък. Експериментални изследвания демонстрират,

че йоните играят ключова роля в процеса на нуклеация на аерозоли (Svensmark, 2007; Kirkby, 2011). Допълнително е установено, че те ускоряват растежа на аерозолните частици (Svensmark et al., 2017), което повишава вероятността последните да достигнат размери, позволяващи им да функционират като ядра на кондензация на облаци. Наблюденията на т.нар. спадове от тип „Forbush“ (внезапни намаления на потока космически лъчи с продължителност около седмица) показват промени в редица облачни параметри, включително облачна покривка, оптична дебелина, съдържание на течна вода и ефективен радиус на облачните капки (Svensmark, 2009; J. Svensmark et al., 2016). Данни от инструмента CERES също потвърждават въздействието върху радиационния баланс на Земята (Svensmark et al., 2021).

Използването на електрическият потенциал (ЕП) на йоносферата като един от хелиогеофизичните параметри при анализа на процесите в системата магнитосфера-йоносфера-тропосфера показва тропосферния отговор на слънчевата радиация по време на мощни геомагнитни бури. В тази връзка, знаем, че най-известните електрически механизми за влияние на слънчевата активност върху тропосферата са насочени към определяне на промените в постъпващата слънчева радиация. Електрическото поле в йоносферата, чрез промени в глобалната електрическа верига, влияе върху микрофизиката на облаци, като по този начин променя постъпващата късовълнова радиация [Harrison, Lockwood, 2020]. Според електрическият механизъм, разработен в Института по слънчева и земна физика на АН РФ (ISTP, RAS), промените в слънчевата активност, чрез промени в параметрите на слънчевия вятър (СВ) и междупланетното магнитно поле (ММП), влияят на магнитосферната конвекция, която от своя страна влияе върху разпределението на разликата в ЕП между йоносферата и Земята. Увеличаването на ЕП води до преструктуриране на вертикалния профил на обемния електрически заряд, което влияе върху фазовото състояние на водните пари (увеличаване на образуването на облаци в атмосферата) и промяна в състава на клъстерите в области без облаци (увеличаване на броя на димерите и по-големите клъстери). Следователно, оптичните свойства на водните пари се променят в инфрачервената област на спектъра, като по този начин се засилва парниковият ефект в атмосферата. В резултат на това настъпват промени в радиационния баланс на атмосферата, по-специално в изходящия дълговълнов поток ($\lambda > 4 \mu\text{m}$) [Molodykh et al., 2020].

Всички характеристики на слънчевата/геомагнитна активност са разработени, за да опишат динамичните процеси на Слънцето и влиянието им върху околоземното пространство. Изследването на изменението на климата, свързано със слънчевите въздействия, изисква характеристика, която отразява влиянието на Слънцето, достигащо до Земята. Като при това, физическото измерване на тази характеристика трябва да има дълъг времеви ред. Както знаем, най-често използваният показател за слънчево-тропосферни взаимодействия е относителният брой на слънчевите петна (число на Волф) [Ishkov, 2018]. Обикновено, дълга серия от числа на Волф се използва за изучаване на цикличността в дългосрочните вариации на метеорологичните параметри. Геомагнитните индекси обаче, по-добре отговарят на това условие, но те описват предимно геомагнитни вариации с продължителност по-малко от три часа и глобалният им характер не позволява тяхното пространствено разпределение [Yamazaki et al., 2022]. В друга работа [Karakhanian, Molodykh, 2023] е показано, че пространствено-времевата динамика на

вариациите на ЕП през изследван период на затопляне може да се анализира с помощта на сателитни данни за магнитното поле на Земята и параметрите на плазмата в околоземното пространство. Пак там, е показано, че през последните три слънчеви цикъла се наблюдава тенденция към увеличаване на ЕП. Обратната тенденция е характерна за геомагнитните индекси. Наблюдаваната синхронност на дългосрочните вариации в ЕП и температурата на повърхността на Земята вероятно се определя от едромасщабното слънчево магнитно поле в по-голяма степен, отколкото от дребномасщабното, и влияе върху промените в параметрите на самата климатична система.

В работата на [Караханян А.А., Молодых С.И., 2025] са показани резултати от изследване на реакцията на метеорологичните параметри (изходяща дълговълнова радиация, валежи и високата облачна покривка) на вариациите на ЕП по време на отделни мощни геомагнитни бури в слънчев цикъл 23. Тропосферният отклик е изследван за географски ширини над 60° северна ширина и е показано, че геомагнитния индекс АЕ, който описва смущението на магнитното поле на Земята при високи географски ширини го отразява. Данните за междупланетната среда и геомагнитните индекси (АЕ, АL) с почасова резолюция са получени от базата данни OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html]. Използвани са почасови стойности на метеорологичните параметри от набора от данни CERES-SYN1deg върху мрежа $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ [Wielicki et al., 1996, CERES_SYN1degEd4.1SubsettingandBrowsing].

Анализът показва, че:

1. Има положителната връзка между вариациите на ЕП и геомагнитния индекс АЕ е нарушена по време на основната фаза на мощните геомагнитни бури. Тази открита характеристика предполага, че вариациите на ЕП отразяват както спорадични процеси, така и бавни промени в едромасщабното магнитно поле на Слънцето, за разлика от геомагнитните индекси, които характеризират степента на смущение на магнитното поле на Земята.
2. Отговорът на метеорологичните параметри се случва едновременно с вариациите на ЕП по време на много голямата магнитна буря от 20 ноември 2003 г., причинена от изключително геоэффективно събитие на Слънцето [Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др., 2005].
3. Тропосферният отговор се измества във времето спрямо максимума на ЕП по време на много силната магнитна буря от 15 юли 2000 г.: наблюдава се увеличение на числото на Волф - W след 6 часа, намаление на изходящата дълговълнова радиация (ИДР) след 12 часа и увеличение на облачността на горните нива след 18 часа [Клейменова Н.Г., Козырева О.В., 2009]. (Изходящата дълговълнова радиация е широколентовият излъчен топлинен изходящ поток, наблюдаван от CERES в горната част на атмосферата (надморска височина $h \sim 20$ km))

Резултатите на Burns и др. (2008) за влиянието на глобалната атмосферна електрическа верига върху вариациите в атмосферното налягане в полярните райони намират пряко съответствие с наблюденията от настоящото проучване на пещера Колкина дупка и

пукнатинно-дренажните системи в Антарктика. И в двата случая се наблюдава външно въздействие, свързано със слънчевата активност, което се проявява под формата на корелации между параметри на слънчевата активност (брой слънчеви петна, IMF, F10.7 индекс) и атмосферни или подземни термодинамични процеси. Основният резултат е, че вариациите на налягането (Δp) в Антарктида и Арктика показват малка, но статистически значима корелация с компонентата V_u на междупланетното магнитно поле (IMF) и особено с промените в електрическото поле (ΔE), индуцирани от слънчевия вятър. Тези връзки се дължат на разликата в потенциала между йоносферата и земната повърхност, която при „добри“ атмосферни условия достига ~ 250 kV, със средно електрическо поле над континентална Антарктида от ~ 190 V/m. Подобно на регистрираните в Антарктида малки, но статистически значими връзки между компонентите на слънчевия вятър и наземното налягане, и в настоящите данни се установяват умерени до слаби, но значими корелации между показателите за слънчева активност и температурите или въздушните потоци в пещерата. Това показва, че действието на слънчевата активност върху локалната термодинамика се осъществява чрез радиационни механизми, а не чрез пряко топлинно въздействие.

И в двата набора от наблюдения се открива времево закъснение между промените в слънчевата активност и реакцията на атмосферата и подповърхностните процеси, от порядъка на няколко дни. В полярните станции това закъснение е интерпретирано като резултат от вътрешни атмосферни механизми и облачна микрофизика; в случая на Колкина дупка то може да се свърже с инерцията на въздушния обмен в пещерната система и забавеното проникване на топлинните импулси.

Същественото сходство между двете изследвания е в това, че и при антарктическите наблюдения, и при измерванията в пещерната среда се установява, че слънчевата активност оказва косвено, но реално влияние върху динамиката на въздуха и енергийните потоци в атмосферата и литосферата, като този ефект е електрически обусловен и медиран от локални метеорологични условия. Това е в съответствие с идеята, че глобалната атмосферна електрическа верига е универсален механизъм на слънчево-земни взаимодействия.

Заклучение

Съвременните изследвания все по-убедително показват, че слънчевата активност влияе на карстовите и криокарстовите системи чрез сложен комплекс от механизми. Тези среди действат като естествени лаборатории и архиви – в тях се отразяват малките колебания на климата, продиктувани от Слънцето. Пещерните температури и въздушни потоци реагират дори на 11-годишния цикъл, пермафростът проявява соларни ритми в топлинния си режим, а процеси като напукване на скалите и отлагане на седименти могат да се усилят или отслабват в синхрон с цикличните слънчеви промени. Тези влияния, макар и не толкова драматични като глобалното затопляне, имат голяма научна стойност и ни помагат да разберем по-добре взаимодействието между външните (космическите) фактори и вътрешните карстови системи и ледникови цепнатини на Земята.

Приноси на дисертацията

- За първи път е направен сравнителен анализ на метеорологичните условия в карстови и криокарстови среди (Понор планина, България и о. Ливингстън, Антарктида) и връзката им със слънчевата активност.
- Установени са корелации между температурния режим във вътрешността на галериите и ледниковите пукнатини и вариациите на слънчевата активност.
- Предположена е ролята на облачността и радиационния баланс като медиатори на слънчевото въздействие върху локалните климатични системи.
- Намерена е статистически значима и съгласувана връзка между динамиката на температурите и въздушните течения в системите от цепнатини и дренажни канали на антарктическите ледници и слънчевата активност.
- Документирани са нови полеви наблюдения за разширяването на ледниковите пукнатини и образуване на субгласиални езера, свързани с динамиката на слънчевата активност.
- Разработена е интердисциплинарна методика, включваща едновременно физични, микроклиматични и геофизични измервания.
- Въведено е използване на дрон и сензорни мрежи за измерване на температурни и морфометрични параметри на ледникови пукнатини.
- Приложени са статистически модели за корелационен анализ между температурата на въздуха във вътрешността на карстовата пещерна система и ледниковите пукнатини и слънчевата активност (брой слънчеви петна, 10.7 cm радиоизлъчване).
- Изследванията в Понор планина допринасят за по-добро разбиране на взаимодействието между атмосферни фактори и подземни карстови системи, с практическо значение за управлението на водните ресурси в България.
- Извлечени са нови данни за динамиката на ледниците на о. Ливингстън, полезни за мониторинг на климатичните промени в региона.

- Дисертацията предлага модел за интегриране на географски, климатични и слънчево-земни данни, приложим в бъдещи изследвания на глобални и регионални климатични процеси.

Статии на автора по темата на дисертационния труд

1. Parov, T. (2023). *Influence of atmospheric conditions and solar activity on the underground karst system of the Ponor Mountain*. **Journal of the Bulgarian Geographical Society**, 49, 63–74. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e11403>
2. Parov, T. (2024). *Temperature distribution in the crevasse-drainage systems of the Antarctic glaciers: A case study of the Perunika Glacier*. **Journal of the Bulgarian Geographical Society**, 50, 1–15. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e126650>
3. Parov T (2026) Temperature dynamics in crevasse-drainage systems of Antarctic glaciers. *Journal of the Bulgarian Geographical Society* 54: 1-26. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e153003>

Литература:

Benderev, A. (1989). *Karst and karst waters in Ponor Mountain*. PhD thesis, Research Institute of Mineral Resources, Sofia, 157 p.

Burns G. B., Tinsley B. A., French W. J. R., Troshichev O. A. and Frank-Kamenetsky A.V., Atmospheric circuit influences on ground-level pressure in the Antarctic and Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, August 2008. DOI: 10.1029/2007JD009618.

Badino, Giovanni. 2004. Cave temperatures and global climatic change. *International Journal of Speleology*, 33: 103-113.

Badino, Giovanni. (2005). Underground Drainage Systems and Geothermal Flux. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*. 34. 10.3986/ac.v34i2.261.

Dinev, P. (1959). Experiment for determination of the hydrogeological watershed of Iskrets Karst Springs. In *Karst Underground Waters in Bulgaria*. Sofia: Tehnika, pp. 162–182. (in Bulgarian)

Harrison R.G., Lockwood M. Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere.

Jørgensen, T. S., & Hansen, A. W. (2000). Comments on "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — a missing link in solar-climate relationships" by Henrik Svensmark and Eigil Friis-Christensen (*Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, 1125–1232). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 73–77.

Kirkby, Jasper. „Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation“. The CLOUD Collaboration. *Nature*, 2011.

Parov, T. (2023). Influence of atmospheric conditions and solar activity on the underground karst system of the Ponor Mountain. *Journal of the Bulgarian Geographical Society*, 49, 101–112. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e114034>

Parov, T. (2024). Temperature distribution in the crevasse-drainage systems of the Antarctic glaciers: A case study of the Perunika Glacier. *Journal of the Bulgarian Geographical Society*, 51, 63–84. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e126650>

Svensmark, H. (2006). The Antarctic Climate Anomaly and Galactic Cosmic Rays. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(18), 2266–2278.

Svensmark, H., J., Enghoff, M. B., & Shaviv, N. J. (2021). Atmospheric ionization and cloud radiative forcing. *Scientific Reports*, 11, 19668. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99033-1>

Svensmark, H., & Friis-Christensen, E. (1997). Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59(11), 1225–1232. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(96\)00172-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00172-2)

Svensmark, H., Bondo, T., & Svensmark, J. (2009). Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophysical Research Letters*, 36(15), L15101. <https://doi.org/10.1029/2009GL038429>

Svensmark, H., Enghoff, M. B., & Shaviv, N. J. (2016). The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(8), 8152–8181. <https://doi.org/10.1002/2016JA022689>

Svensmark, H., Enghoff, M. B., Shaviv, N. J., & Svensmark, J. (2017). Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei. *Nature Communications*, 8, 2199. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02082-2>

Svensmark, Pedersen J. O. P., Marsh N. D., Enghoff M. B. & Uggerhøj U. I. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. *Proceedings of the Royal Society A*, 463(2078), 2007, 385–396.

Usoskin, I.G. (2017). A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics*. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>

Yamazaki Y., Matzka J., Stolle C., et al. Geomagnetic activity index H_{pro}. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(10), e2022GL098860. DOI: 10.1029/2022GL098860.

Апродов, Гвоздецкий, Максимович (1947/1954/1979). Определение на термин „гипокарст“. В: *Терминология карста*.

Ишков В. Н., Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2018. Т. 58, № 6. С. 785–800. DOI: 10.1134/S0016794018060056.

Караханян А.А., Молодых С.И. Электрический потенциал ионосферы — альтернативный индикатор солнечного воздействия на нижнюю атмосферу. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 111–115. DOI: 10.12737/szf92202313 // Karakhanyan A.A., Molodykh S.I. Ionospheric electric potential as an alternative indicator of solar effect on the lower atmosphere. *Solar-Terrestrial Physics*, 9(2), 103–106. DOI: 10.12737/stp-92202313.

Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. Оценка влияния солнечной активности на уходящий поток инфракрасного излучения. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2020. Т. 60, № 2. С. 208–215. DOI: 10.31857/S0016794020020108.

