

Prądnik. Prace Muz. Szafera	23	75–90	2013
-----------------------------	----	-------	------

JAKUB WOJKOWSKI

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e-mail: rmwojkow@cyf-kr.edu.pl

MIKROKLIMAT I MIKROFLORA JASKIŃ OJCOWSKIEGO PARKU NARODOWEGO

Microclimate and microflora of caves of Ojców National Park

Abstract. The article presents the results of microclimatic investigations conducted in four caves of Ojców National Park, namely the Jama Ani, Okopy Górna, Sąspowska and Złodziejska Caves. The caves singled out for the study differed from each other in the situation in relation to the valley floor, the course and system of corridors, and the number of mouths. Based on thermal-humidity measurements thermal zones and microclimatic types were identified in the investigated caves. The microclimatic studies were accompanied by microbiological measurements which focused on determining the quantity of microflora occurring in the cave environment. The microbiological measurements showed that particularly bacteria and actinomycetes find in the cave environment very favourable conditions for the development.

Key words: microclimate, microbiology, caves, Ojców National Park

WSTĘP

Środowisko podziemne ojcowskich jaskiń z punktu widzenia klimatologii jest stosunkowo najsłabiej przebadanym elementem środowiska przyrodniczego Ojcowskiego Parku Narodowego (OPN). Na jego obszarze jaskinie położone są przede wszystkim na zboczach licznych dolin i wąwozów, a także w zrębowych wzgórzach i ostańcowych skałkach wapiennych (Gradziński 2001). Liczba znanych i wzmiankowanych w literaturze jaskiń analizowanego obszaru w ostatnich kilkunastu latach gwałtownie wzrosła, głównie w wyniku kompleksowej inwentaryzacji przeprowadzonej przez zespół krakowskich speleologów pod kierunkiem M. Gradzińskiego. W prawobrzeżnej części dorzecza Prądnika skatalogowanych i opisanych zostało 414 jaskiń o sumarycznej długości przekraczającej 4 km (Bisek i in. 1992, Gradziński i in. 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999). Dla porównania Szelerewicz i Górny (1986) wymieniają z tego obszaru 124 jaskinie o łącznej długości ponad 2 km.

W niniejszej pracy pod terminem mikroklimatu należy rozumieć właściwości fizyczne powietrza wypełniającego komory i korytarze jaskiń. Warunki mikroklimatyczne jaskiń, a także ich wpływ na różne procesy przyrodnicze zachodzące pod ziemią od dawna

przyciągały uwagę przyrodników. Chociaż zainteresowanie naukowców koncentrowało się głównie na tatrzańskich jaskiniach to na terenie OPN również prowadzono pewne obserwacje.

Jednym z pierwszych przyrodników, który wykonał pomiary w ojcowskich jaskiniach był zoolog K. Demel (1918). Pomierzył latem 1914 roku temperaturę w głębi Jaskini Zbójeckiej (6,5°C), Jaskini Ciemnej (7,5°C) i Jaskini Łokietka (5,0°C).

Badania speleologiczne na szerszą skalę zapoczątkował Z. Ciętak (1935) sporządzając pierwszą inwentaryzację ojcowskich jaskiń oraz plany i opisy większych z nich. Stwierdził, że temperatura głębokich partii jaskiń w lipcu i sierpniu wahała się od 7,0 do 9,0°C i zauważył, że korelowała ona z temperaturą okolicznych wywierzysk. Wkrótce po nim inwentaryzację jaskiń Wyżyny Krakowsko-Wieluńskiej wykonał K. Kowalski (1951), który stwierdził, że temperatura w głębokich partiach ojcowskich jaskiń wynosiła około 7,0°C i była stała przez cały rok.

W latach 1961–1965 Sekcja Klimatologiczna Koła Geografów Uniwersytetu Jagiellońskiego pod kierunkiem J. Kleina i T. Niedźwiedzia prowadziła badania mikroklimatyczne OPN oraz w jaskiniach Ciemnej, Zbójeckiej i Piętrowej (Klein i in. 1965).

W 1967 roku J. Klein (1992) wykonał badania w Jaskini Ciemnej. Wykazał, że temperatury w głębi jaskini mieściły się w takim samym zakresie jak wartości średnich wieloletnich temperatur na wierzchołku (Klein 1992).

Na początku lat 90. XX w. grupa studentów Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Warszawskiego wykonała kilka serii pomiarów w Jaskini Białej (Gula i in. 1995). Ich pomiary wykazały dużą zmienność temperatury i wilgotności powietrza z uwagi na dwa istniejące otwory wejściowe.

Dłuższe obserwacje w jaskiniach OPN wykonała grupa studentów Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Łódzkiego (Podstawczyńska, Charciarek 2002). Obserwacjami objęto Jaskinię Ciemną, Jaskinię Łokietka, Jaskinię Okopy Wielką Dolną, Jaskinię Zbójecką i Jaskinię Złodziejską. Na podstawie czterech serii pomiarowych dokonano charakterystyki warunków termiczno-wilgotnościowe i określono typ mikroklimatu badanych jaskiń. Badania mikroklimatu jaskini Łokietka w ramach pracy magisterskiej wykonała J. Wiczorek (1992)

Pełna bibliografia prac dotyczących badań mikroklimatu jaskiń Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej przedstawiona została w artykule „Warunki mikroklimatyczne jurajskich jaskiń” (Wojkowski 2001).

Na słabą znajomość mikroklimatu jaskiń OPN oraz potrzebę ich przebadania wielokrotnie zwracał uwagę w swoich pracach J. Klein (1974, 1992). Jak wynika z dotychczasowego stanu wiedzy, większość z przeprowadzonych w ojcowskich jaskiniach badań mikroklimatycznych dotyczyła pojedynczych pomiarów bądź obserwacji obejmujących tylko jeden element meteorologiczny, najczęściej temperaturę powietrza. Obserwacje te były prowadzone zwykle przy okazji innych badań przyrodniczych lub penetracji jaskiń. Tylko w sporadycznych przypadkach zakres pomiarów był szerszy i powtarzany cyklicznie w różnych porach roku.

Mając na uwadze istniejący stan wiedzy przeprowadzono w ojcowskich jaskiniach długoterminowe pomiary mikroklimatyczne. Głównym celem badań było scharakteryzowanie warunków termicznych i wilgotnościowych panujących w jaskiniach zróżnicowanych pod względem morfologicznym. Wytypowano w tym celu jaskinie różniące się położeniem względem dna doliny, przebiegiem i układem korytarzy, liczbą otworów oraz

odmiennymi warunkami cyrkulacji powietrza. Pomiarami objęto trzy jaskinie w Dolinie Sąpowskiej: Jamę Ani, Sąpowską i Złodziejską oraz jedną w Dolinie Prądnika – Jaskinię Okopy Górna.

Badaniom mikroklimatycznym towarzyszyły pomiary mikrobiologiczne, zmierzające do określenia liczebności mikroflory występującej w powietrzu wypełniającym korytarze i komory jaskiń. Na podkreślenie zasługuje unikatowy charakter tych badań gdyż oznaczenia zawartości mikroflory w powietrzu jaskiniowym bardzo rzadko wykonywane były w polskich jaskiniach. Przykładem podobnych badań mogą być oznaczenia mikrobiologiczne wykonane przez R. Ogórka i A. Lejmana (2013) w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie, lecz wykonano je jednorazowo i ograniczyły się wyłącznie do oznaczenia zawartości grzybów.

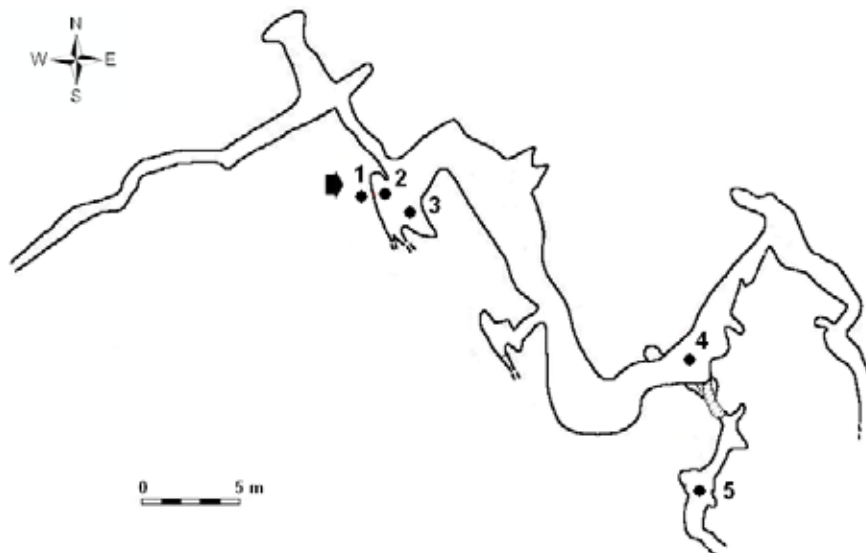
MATERIAŁ I METODY

Obserwacje mikroklimatyczne w ww. jaskiniach wykonano w latach 1999–2001 w czterech porach roku podczas dwutygodniowych serii pomiarowych: wiosną (12–25.04.1999 oraz 17–30.04.2000), latem (12–25.07.1999 oraz 17–30.07.2000), jesienią (11–24.10.1999 oraz 16–29.10.2000) i zimą (17–30.01.2000 oraz 15–28.01.2001).

W wytypowanych jaskiniach założono stałe stanowiska pomiarowe (ryc. 1, 2, 3 i 4) na których przy użyciu miniaturowych elektronicznych czujników StowAway® XTI i StowAway® RH dokonywano automatycznej rejestracji temperatury oraz wilgotności względnej powietrza na wysokości 1,0 m nad spągiem jaskini. Dla każdej pory roku wykonano w odstępie rocznym dwie serie pomiarowe. Każda seria trwała nieprzerwanie 14 dni, a rejestracja odbywała się z 30-minutowym interwałem pomiarowym. Błąd rejestratora temperatury wynosił $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, a wilgotności względnej $\pm 5\%$. Dokładność pomiaru obu rejestratorów StowAway była badana w Katedrze Meteorologii i Klimatologii Rolniczej Akademii Rolniczej w Krakowie (Wojkowski, Olechnowicz-Bobrowska 1997). Automatyczne bezobsługowe rejestratory pomiarowe dzięki niewielkim wymiarom (45x47x15 mm) były łatwe do ukrycia przed ewentualną kradzieżą i umożliwiły długotrwałe pomiary w miejscach tak trudno dostępnych jak jaskinie. Podczas instalacji i deinstalacji rejestratorów wykonywano dodatkowo pomiary kontrolne psychrometrem aspiracyjnym Assmana. Posługując się standardowymi metodami statystycznymi obliczono średnie wartości temperatury i wilgotności względnej oraz ich amplitudy.

Pomiary mikrobiologiczne były wykonywane zawsze w pierwszym dniu każdej z wyżej wymienionych serii pomiarowych. Próbkę powietrza do badań mikrobiologicznych pobierano metodą zderzeniową przy użyciu impaktora MAS firmy Merck. W każdym punkcie pomiarowym impaktor umieszczano na wysokości 1,0 m nad spągiem jaskini i pobierano próbki powietrza w trzech powtórzeniach. Aerosol bakteryjny badano na agarze tryptozowo-sojowym (TSA), promieniowce na agarze Gauze'a, a grzyby na agarze z ekstraktem słodowym (MEA). Płytki TSA inkubowano przez 1 dobę w 37°C a następnie przez 3 doby w 22°C i przez następne 3 doby w 4°C . Płytki Gauze'a inkubowano w 28°C przez 7 dni, a płytki MEA przez 4 doby w 30°C , a następnie przez 4 doby w 22°C . Po inkubacji płytek przeprowadzono analizy ilościowe wyrosłych mikroorganizmów. Zawartość mikroflory (stężenie bioaerozolu) obliczono jako liczbę jednostek tworzących kolonie przypadają-

jąca na jeden metr sześcienny powietrza (cfu/m^3). Analizy ilościowe mikroflory zostały wykonane przez dr inż. K. Frączka z Katedry Mikrobiologii Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie za co niniejszym chciałbym serdecznie podziękować.



Ryc. 1. Plan Jaskini Jama Ani z lokalizacją stanowisk pomiarowych

Fig. 1. Plan of the Jama Ani Cave with the location of measurement sites

WYNIKI

Mikroklimat Jaskini Jama Ani

Jaskinia Jama Ani (ryc. 1) wyróżniała się wśród badanych jaskiń znaczną głębokością korytarzy (30,5 m), co stawia ją na pierwszym miejscu wśród najgłębszych jaskiń OPN. Penetracja bezpośredniego i rozproszonego światła sięgała jedynie samego otworu wejściowego. Wejście do jaskini stanowi bardzo małe przewężenie (60 x 40 cm) zamknięte metalowymi drzwiami, które zupełnie odcinało dostęp światła do jej wnętrza, oraz ograniczało swobodną wymianę powietrza. Wyniki pomiarów mikroklimatycznych przedstawiono w tabeli 1.

Jaskinia Jama Ani należy do jaskiń statycznych w których obserwowano stagnację powietrza. Zmiany temperatury powietrza w jaskini wyraźnie korelowały z głębokością względem otworu wejściowego. Okres zimowy charakteryzował się odwróconym układem termicznym. Temperatura w głębszych częściach jaskini była zdecydowanie wyższa od temperatury strefy przyotworowej i zmieniała się od $-5,0^{\circ}\text{C}$ (otwór wejściowy) do $8,6^{\circ}\text{C}$ (na głębokości 25 m). Podobny układ termiczny miał miejsce jesienią gdzie temperatura w strefie przyotworowej była niższa niż w głębi jaskini ale różnice nie były już tak duże. W okresie letnim i wiosennym warunki termiczne w jaskini cechowała wyższa temperatura powietrza w strefie przyotworowej niż głębszych jej partiach gdzie wynosiła $8,6^{\circ}\text{C}$.

Tabela 1. Średnia temperatura i wilgotność względna powietrza oraz ich amplitudy w Jaskini Jama Ani (1999–2001)

Table 1. Mean air temperature and relative humidity and their amplitudes in the Jama Ani Cave (1999–2001)

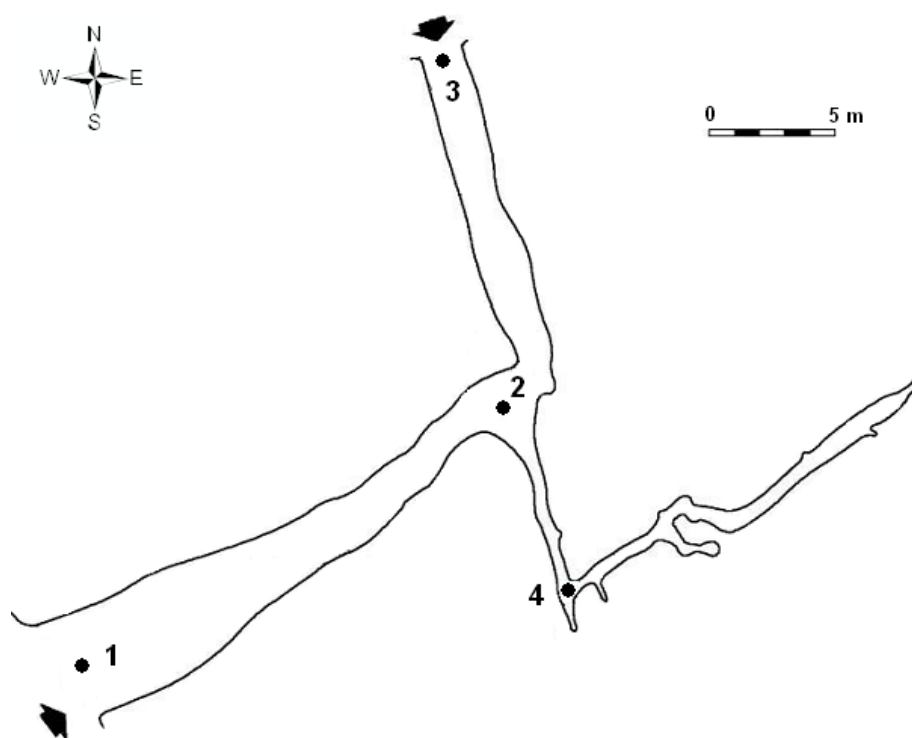
Pora roku Season of the year	Stanowisko pomiarowe Measurement site	Temperatura powietrza (°C) Air temperature (°C)	Amplituda temperatury (°C) Amplitude of temperature (°C)	Wilgotność względna (%) Relative humidity (%)	Amplituda wilgotności (%) Amplitude of humidity (%)
Wiosna Spring	1	9,7	13,2	70	45
	2	6,8	9,2	85	18
	3	7,2	1,0	100	7
	4	7,4	0,7	100	5
	5	8,6	0,7	100	5
Lato Summer	1	14,3	14,0	64	49
	2	10,1	11,0	72	20
	3	7,1	0,5	100	7
	4	7,3	0,6	100	4
	5	8,6	0,4	100	5
Jesień Autumn	1	6,2	12,0	54	39
	2	5,0	11,7	83	15
	3	7,4	1,1	100	7
	4	7,4	0,9	100	5
	5	8,7	0,6	100	5
Zima Winter	1	-5,0	9,3	80	30
	2	0,8	5,0	91	12
	3	7,1	0,6	100	7
	4	7,3	0,5	100	5
	5	8,6	0,6	100	5

Amplitudy temperatur powietrza również wyraźnie zmieniały się wraz z odległością od otworu wejściowego. W ciągu roku największe wahania temperatury rejestrowane były w otworze jaskini i zmniejszały się w miarę wzrostu głębokości. Warunki termiczne najgłębszych stref jaskini cechowała już duża stałość. W najniższej położonej komorze wahania w ciągu roku nie przekroczyły 1,0°C.

Ze względu na brak dobrej wentylacji i przypowierzchniowe położenie, umożliwiające wnikanie wody opadowej, Jaskinię Jama Ani można zaklasyfikować do jaskiń wilgotnych. Świadczyły o tym liczne kałuże w namulisku na dnie studni wlotowej jaskini. Wilgotność względna powietrza wewnątrz jaskini przez cały rok była bardzo wysoka i utrzymywała się w granicach od 80% (w połowie 15-metrowej studni wlotowej) do 100% (w najgłębszych partiach jaskini). Warunki wilgotnościowe charakteryzowały się przez cały rok dużą stałością. Jedynie w strefie przyotworowej amplitudy wilgotności przyjmowały wyższe wartości. W głębi jaskini średnie wahania w ciągu roku nie przekraczały 5%.

Mikroklimat Jaskini Okopy Górna

Jaskinię Okopy Górna (ryc. 2) wyróżniało wśród badanych jaskiń wysokie usytuowanie nad dnem doliny (ok. 100 m) oraz posiadanie dwóch otworów wejściowych o dużych rozmiarach. Penetracja bezpośredniego światła sięgała tylko otworu południowo-zachod-



Ryc. 2. Plan Jaskini Okopy Górna z lokalizacją stanowisk pomiarowych

Fig. 2. Plan of the Okopy Górna Cave with the location of measurement sites

niego. Światło rozproszone dochodziło prawie do całej jaskini, za wyjątkiem bocznego korytarza w wąskiej szczelinie. Wyniki pomiarów mikroklimatycznych przedstawiono w tabeli 2.

Jaskinia Okopy Górna należy do jaskiń dynamicznych, w których obserwowano bardzo wyraźny ruch powietrza. Obecność dwóch dużych otworów jaskini sprzyjało swobodnemu przepływowi powietrza. Ściany głównego korytarza przez cały okres badań były suche. W jaskini tej stwierdzono zdecydowanie większe zmiany temperatury powietrza niż w statycznej Jaskini Jama Ani. Jaskinia dzięki niewielkiej długości korytarza (ok. 58 m) oraz istnieniu dwóch dużych otworów wejściowych, wyróżniała się na tle badanych jaskiń specyficznym mikroklimatem. Dobre warunki wentylacyjne sprzyjały swobodnemu oddziaływaniu zewnętrznych czynników pogodowych na warunki termiczno-wilgotnościowe głównego korytarza jaskini. Stąd też we wszystkich porach roku różnice między strefą przyotworową a wnętrzem jaskini były niewielkie. Wyjątek stanowiło stanowisko pomiarowe nr 4 znajdujące się w wąskim bocznym korytarzu. W okresie zimowym przy średniej temperaturze części przyotworowej $-5,0^{\circ}\text{C}$, na stanowisku pomiarowym nr 4 rejestrowano temperaturę dodatnią $4,9^{\circ}\text{C}$. Latem temperatura była tam niższa ($9,0^{\circ}\text{C}$) niż przy otworach (odpowiednio $16,8$ i $15,7^{\circ}\text{C}$). Jesienią natomiast w całej jaskini temperatury utrzymywały się na podobnym poziomie, tj. średnio $7,4^{\circ}\text{C}$.

Tabela 2. Średnia temperatura i wilgotność względna powietrza oraz ich amplitudy w Jaskini Okopy Górna (1999–2001)

Table 2. Mean air temperature and relative humidity and their amplitudes in the Okopy Górna Cave (1999–2001)

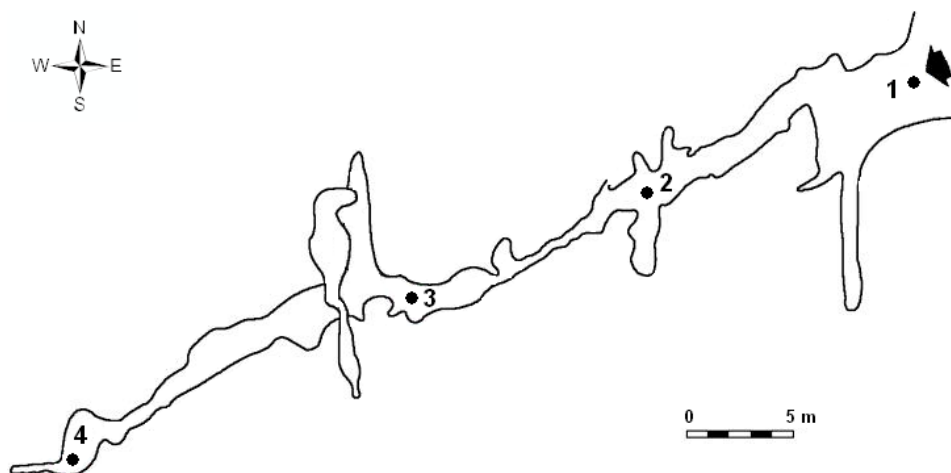
Pora roku Season of the year	Stanowisko pomiarowe Measurement site	Temperatura powietrza (°C) Air temperature (°C)	Amplituda temperatury (°C) Amplitude of temperature (°C)	Wilgotność względna (%) Relative humidity (%)	Amplituda wilgotności (%) Amplitude of humidity (%)
Wiosna Spring	1	10,2	17,1	65	35
	2	7,9	10,9	75	19
	3	8,7	15,8	69	32
	4	8,1	6,0	95	5
Lato Summer	1	16,8	19,0	61	40
	2	15,7	11,5	70	26
	3	14,1	17,3	67	38
	4	9,0	5,0	98	7
Jesień Autumn	1	7,6	16,1	62	39
	2	7,3	8,0	68	25
	3	7,0	14,3	70	36
	4	7,6	5,0	97	6
Zima Winter	1	-4,9	8,5	84	35
	2	-5,0	5,4	90	15
	3	-6,0	7,1	84	33
	4	4,9	4,0	96	5

Wahania temperatur powietrza w głównym korytarzu jaskini wykazywały dużą zmienność. Największe amplitudy obserwowano przy otworze południowo-zachodnim i zmniejszały się w miarę przesuwania się w głąb jaskini. W środku głównego korytarza średnia amplituda w okresie badań wyniosła 8,9°C. Mniejsza była jedynie w bocznym korytarzu, na stanowisku pomiarowym nr 4 (5,0°C). Warunki termiczne w tym miejscu jaskini były najbardziej stabilne.

Warunki wilgotnościowe zmieniały się w zależności od pory roku. Najwyższą wilgotność obserwowano w okresie zimowym, a najniższą w okresie lata. Jedynym miejscem gdzie wilgotność powietrza przez cały rok była bardzo duża był boczny korytarz (stanowisko pomiarowe nr 4). Duże amplitudy wilgotności względnej powietrza sięgające nawet 40%, były wynikiem dobrych warunków wentylacyjnych jaskini uwarunkowanych istnieniem dwóch dużych otworów. Podczas badań nie zaobserwowano gromadzenia się wody na spągu jaskini, co było dowodem na istnienie wysuszającej cyrkulacji powietrza.

Mikroklimat Jaskini Sąpowskiej

Jaskinię Sąpowską (ryc. 3) spośród badanych jaskiń wyróżniał długi korytarz (100 m) o rozwinięciu poziomym oraz stosunkowo duża deniwelacja (13 m). Światło w postaci rozproszonej docierało jedynie do początkowej około 10-metrowej części przyotworowej jaskini. Penetracja bezpośredniego światła była bardzo ograniczona na skutek dużego zasłonięcia horyzontu w otoczeniu otworu wejściowego do jaskini. Wyniki pomiarów mikroklimatycznych przedstawiono w tabeli 3.



Ryc. 3. Plan Jaskini Saspowskiej z lokalizacją stanowisk pomiarowych

Fig. 3. Plan of the Saspowska Cave with the location of measurement sites

Tabela 3. Średnia temperatura i wilgotność względna powietrza oraz ich amplitudy w Jaskini Saspowskiej (1999–2001)

Table 3. Mean air temperature and relative humidity and their amplitudes in the Saspowska Cave (1999–2001)

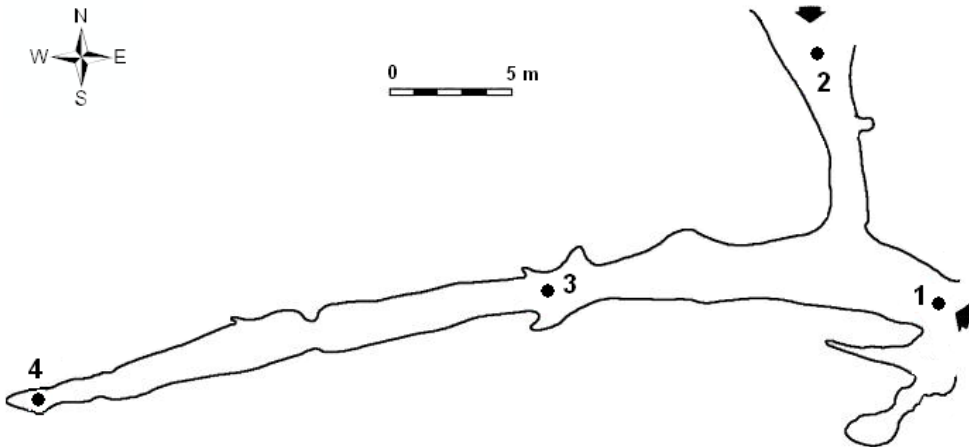
Pora roku Season of the year	Stanowisko pomiarowe Measurement site	Temperatura powietrza (°C) Air temperature (°C)	Amplituda temperatury (°C) Amplitude of temperature (°C)	Wilgotność względna (%) Relative humidity (%)	Amplituda wilgotności (%) Amplitude of humidity (%)
Wiosna Spring	1	8,9	12,3	84	42
	2	7,0	2,3	96	5
	3	7,3	0,9	100	5
	4	7,3	0,7	100	4
Lato Summer	1	15,7	13,6	67	45
	2	6,8	4,0	96	5
	3	7,3	1,0	100	5
	4	7,3	0,7	100	4
Jesień Autumn	1	8,2	11,9	79	37
	2	7,1	2,0	97	5
	3	7,3	0,9	100	2
	4	7,3	0,8	99	2
Zima Winter	1	-4,8	9,2	81	31
	2	6,8	1,5	98	5
	3	7,3	0,8	100	4
	4	7,3	0,8	100	5

Jaskinia Sąspowska należy do jaskiń statycznych, w których obserwowano stagnację powietrza. Już w odległości około 17 m od otworu wejściowego temperatura powietrza wyraźnie utrzymywała się na stałym poziomie. Okres zimowy charakteryzował się odwróconym układem termicznym. Temperatura w głębszych częściach jaskini była zdecydowanie wyższa od temperatury strefy przyotworowej i zmieniała się od $-4,8^{\circ}\text{C}$ (otwór wejściowy) do $7,3^{\circ}\text{C}$ (powyżej 30-tego metra długości). W pozostałych porach roku, szczególnie latem warunki termiczne w jaskini cechowała wyższa temperatura powietrza w strefie przyotworowej niż w głębszych jej partiach gdzie wynosiła $7,3^{\circ}\text{C}$.

Amplitudy temperatur powietrza również wyraźnie zmieniały się wraz z odległością od otworu wejściowego. W ciągu roku największe wahania temperatury rejestrowane były w otworze jaskini ($11,7^{\circ}\text{C}$) i malały w miarę przesuwania się w głąb jaskini. Warunki termiczne najdalej położonych partii jaskini cechowała bardzo duża stałość. W najodleglejszej komorze wahania w ciągu roku nie przekroczyły $1,0^{\circ}\text{C}$.

Brak dobrej wentylacji i przypowierzchniowe położenie jaskini umożliwiały łatwe wnikanie wody opadowej do jej wnętrza (podobnie jak w Jaskini Jama Ani) co klasyfikuje ją do jaskiń wilgotnych. Świadczyły o tym liczne kałuże w namulisku na całej długości spągu jaskini. Powietrze wewnątrz jaskini przez cały rok było bliskie pełnemu nasyceniu parą wodną. Powyżej 30-tego metra długości jaskini wilgotność względna osiągała wartości 100%. Warunki wilgotnościowe cechowały się bardzo dużą stałością, podobnie jak to miało miejsce w Jaskini Jama Ani. Jedyne w strefie przyotworowej amplitudy wilgotności osiągały wyższe wartości. W głębi jaskini średnie wahania w ciągu roku nie przekraczały 5%.

Mikroklimat Jaskini Złodziejskiej



Ryc. 4. Plan Jaskini Złodziejskiej z lokalizacją stanowisk pomiarowych

Fig. 4. Plan of the Złodziejska Cave with the location of measurement sites

Tabela 4. Średnia temperatura i wilgotność względna powietrza oraz ich amplitudy w Jaskini Złodzijskiej (1999–2001)

Table 4. Mean air temperature and relative humidity and their amplitudes in the Złodzijska Cave (1999–2001)

Pora roku Season of the year	Stanowisko pomiarowe Measurement site	Temperatura powietrza (°C) Air temperature (°C)	Amplituda temperatury (°C) Amplitude of temperature (°C)	Wilgotność względna (%) Relative humidity (%)	Amplituda wilgotności (%) Amplitude of humidity (%)
Wiosna Spring	1	8,4	12,0	72	35
	2	7,9	13,2	73	40
	3	6,0	6,0	100	6
	4	6,1	4,2	100	5
Lato Summer	1	15,2	14,6	69	41
	2	14,6	11,9	68	36
	3	6,7	7,6	95	9
	4	6,8	4,3	95	7
Jesień Autumn	1	8,7	11,4	69	32
	2	8,2	11,8	76	38
	3	6,1	5,5	95	5
	4	6,3	4,5	95	5
Zima Winter	1	-4,5	9,7	79	36
	2	-5,0	10,8	84	33
	3	5,3	4,8	100	6
	4	5,5	3,0	100	5

Jaskinia Złodzijska (ryc. 4) wyróżniała się wśród badanych jaskiń niskim usytuowaniem nad dnem doliny (około 20 m) oraz posiadaniem dwóch otworów wejściowych o mniejszych rozmiarach położonych blisko siebie i stwarzających dobre warunki wentylacyjne. Penetracja światła bezpośredniego ograniczała się jedynie do otworu wschodniego natomiast światło rozproszone dochodziło prawie do samego końca korytarza jaskini. Wyniki pomiarów mikroklimatycznych przedstawiono w tabeli 4.

Jaskinia Złodzijska należy do jaskiń niestabilnych gdzie szczególnie w początkowej części jaskini obserwowano wyraźny ruch powietrza. Obecność dwóch otworów jaskini sprzyjała swobodnemu przepływowi powietrza. Ściany korytarza łączącego dwa otwory przez cały okres badań były suche. Zmiany temperatury powietrza w jaskini były dużo większe niż w omawianych powyżej jaskiniach statycznych ale nieco mniejsze niż w dynamicznej Jaskini Okopy Górna. Dobre warunki wentylacyjne sprzyjały swobodnemu oddziaływaniu zewnętrznych czynników pogodowych na warunki termiczno-wilgotnościowe początkowej części jaskini. We wszystkich porach roku różnice temperatur między strefą przyotworową wschodniego i północnego otworu jaskini były podobne. Odmiennymi warunkami termicznymi charakteryzowały się głębsze części jaskini. W okresie zimowym przy średniej temperaturze części przyotworowej $-4,5^{\circ}\text{C}$, na stanowiskach pomiarowych w głębi jaskini rejestrowano temperaturę dodatnią $5,4^{\circ}\text{C}$. Latem natomiast temperatura była tam niższa ($6,8^{\circ}\text{C}$) niż przy otworach (odpowiednio $15,2$ i $14,6^{\circ}\text{C}$). Jesienią i wiosną różnicowanie temperatur w całej jaskini było najmniejsze.

Największe wahania temperatur powietrza obserwowano przy otworze wschodnim (11,9°C) i zmniejszały się one w miarę przesuwania się w głąb jaskini. W środku głównego korytarza średnia amplituda temperatury wyniosła 6,0°C, a najmniejsza była na końcu jaskini (4,0°C).

Warunki wilgotnościowe jaskini tylko w częściach przyotworowych nieznacznie zmieniały się w ciągu roku. Najwyższą wilgotność obserwowano w okresie zimowym, a najniższą w okresie lata i jesieni. W głębi jaskini wilgotność powietrza przez cały rok była bardzo duża (98%). Duże amplitudy wilgotności w częściach przyotworowych jaskini (dochodzące do 37%) były wynikiem dobrych warunków wentylacyjnych związanych z obecnością dwóch otworów. Podczas badań nie zaobserwowano w tej części jaskini gromadzenia się wody.

STREFY TERMICZNE I TYPY MIKROKLIMATU BADANYCH JASKIŃ

Do oceny warunków mikroklimatycznych badanych jaskiń wykorzystano metodę zaproponowaną przez M. Pulinę (1960), polegającą na wydzieleniu w jaskiniach stref i podstref termicznych, które cechują się w skali roku poniższymi parametrami powietrza:

A. Strefa dynamiczna – amplituda temperatury $> 1,0^{\circ}\text{C}$;

1. podstrefa przyotworowa – amplituda temperatury $> 3,0^{\circ}\text{C}$;

2. podstrefa przejściowa – amplituda temperatury $> 1,0^{\circ}\text{C}$ i $\leq 3,0^{\circ}\text{C}$;

B. Strefa statyczna – amplituda temperatury $\leq 1,0^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\leq 10\%$.

Następnie na podstawie stwierdzenia obecności danej strefy bądź jej braku, dokonano oceny mikroklimatu jaskini. Wydzielono trzy typy mikroklimatu (tab. 5):

1. stabilny – występowanie w jaskini podstrefy przyotworowej i przejściowej, oraz strefy statycznej;

2. niestabilny – występowanie w jaskini jedynie podstrefy przyotworowej i przejściowej;

Tabela 5. Występowanie stref termicznych w badanych jaskiniach oraz przynależność do danego typu mikroklimatu (znak „+” oznacza występowanie danej strefy w jaskini, a znak „-” jej brak)

Table 5. Occurrence of thermal zones in the investigated caves and affiliation to a given type of microclimate (sign „+” means the occurrence of a given zone in the cave, and the sign „-” its absence)

Strefy jaskini Cave zones	Jaskinie – Caves			
	Jama Ani	Okopy Górna	Sąpowska	Złodziejska
Strefa dynamiczna Dynamic zone	+	+	+	+
Podstrefa przyotworowa Near the entrance subzone	+	+	+	+
Podstrefa przejściowa Transition subzone	+	-	+	+
Strefa statyczna Static zone	+	-	+	-
Typ mikroklimatu Type of microclimate	Stabilny Stable	Dynamiczny Dynamic	Stabilny Stable	Niestabilny Unstable

3. dynamiczny – występowanie w przeważającej części jaskini podstrefy przyotworowej.

W jaskini Jama Ani początkowy fragment, który stanowi otwór wejściowy wraz z 15-metrową studnią wlotową, należy do strefy dynamicznej charakteryzującej się dużą zmiennością temperatury w ciągu roku. W obszarze tym wydzielono dwie podstrefy: górną przyotworową do około 7 m głębokości oraz przejściową do 15 m głębokości. Najgłębszą część jaskini (poniżej 15 m), charakteryzującą się niewielkimi w ciągu roku wahaniami temperatury i wilgotności względnej, zaklasyfikowano do strefy statycznej.

W jaskini Okopy Górna, z uwagi na stosunkowo duże wahania w ciągu roku temperatury i wilgotności powietrza, na całej długości korytarza głównego wyróżniono dynamiczną strefę termiczną o cechach podstrefy przyotworowej. Średnie roczne amplitudy temperatury i wilgotności wskazywały na dynamiczny mikroklimat tej jaskini.

W jaskini Szępowskiej oddziaływania zewnętrznych warunków pogodowych są obserwowane w odległości maksymalnie do 15 m od otworu wejściowego. Jest to granica wyznaczonej strefy dynamicznej. W miejscu tym jest przewężenie głównego korytarza, za którym rozciąga się już tylko strefa statyczna. Średnia roczna amplituda temperatury $0,8^{\circ}\text{C}$ i średnia roczna amplituda wilgotności 4% wskazują na stabilny mikroklimat tej jaskini.

W jaskini Złodziejskiej, z uwagi na stosunkowo duże zróżnicowanie w ciągu roku temperatury i wilgotności powietrza, we wstępnej części jaskini wyróżniono dynamiczną strefę termiczną o cechach podstrefy przyotworowej. Głębsze części jaskini, około 20 m od otworu wschodniego, zaliczono do podstrefy przejściowej, a najgłębsze położone na samym końcu jaskini zaliczono do strefy statycznej. Średnia roczna amplituda temperatury $11,0^{\circ}\text{C}$ i średnia roczna amplituda wilgotności 21% wskazują na niestabilny mikroklimat tej jaskini.

MIKROBIOLOGICZNA ANALIZA POWIETRZA JASKIŃ

Z punktu widzenia mikrobiologii powietrze jaskiniowe jest najslabiej przebadanym elementem środowiska jaskiniowego. W literaturze zagranicznej można znaleźć wiele prac poświęconych oznaczeniom mikrobiologicznym w jaskiniach jednak dotyczą one przede wszystkim analiz namulisk, skał lub wody jaskiniowej. Oznaczenia obecności mikroflory w powietrzu jaskiń należą jednak do rzadkości.

Ze względu na słabą penetrację światła słonecznego zasięg występowania roślin zielonych w środowisku jaskiniowym ograniczony jest praktycznie tylko do części przyotworowej. W miarę przemieszczania się w głąb jaskini dostęp światła szybko maleje. W zależności od wielkości otworu, jego ekspozycji i zacielenia może wynosić od kilku do maksymalnie kilkudziesięciu metrów. W głębi jaskiń mikroflora nie posiadająca chloroplastów, której pokarm stanowią martwe ciała owadów i zwierząt, odchody nietoperzy lub butwiejące części organiczne roślin, może występować bardzo licznie. Sprzyjają temu stabilne warunki termiczne, bardzo duża wilgotność i słaba wymiana powietrza.

Przeprowadzone w ojcowskich jaskiniach pomiary mikrobiologiczne, mierzały do określenia liczebności mikroflory występującej w powietrzu jaskiniowym. Oznaczono w powietrzu zawartość trzech grup mikroorganizmów: bakterii, grzybów i promieniowców, a wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Zawartość mikroflory w powietrzu badanych jaskiń wyrażona jako liczba jednostek tworzących kolonie (jtk/m³)

Table 6. Content of microflora in the air of the investigated caves expressed as a number of individuals forming colonies (jtk/m³)

Jaskinia Cave	Stanowisko pomiarowe Measurement site	Bakterie (jtk/m ³) Bacteria (jtk/m ³)	Grzyby (jtk/m ³) Fungi (jtk/m ³)	Promieniowce (jtk/m ³) Actinomycetes (jtk/m ³)
Jama Ani	1	270	137	13
	2	3439	170	154
	3	3157	200	264
	4	2115	318	573
Okopy Górna	1	383	258	28
	2	1675	208	83
	3	483	208	106
	4	2608	367	133
Sąspowska	1	458	258	39
	2	1833	100	67
	3	4075	442	356
	4	4517	275	122

Największą ogółem liczbę mikroflory stwierdzono w Jaskini Sąspowskiej i Jama Ani, a nieco mniejszą w Jaskini Złodziejskiej i Okopy Górnej. Różnice zawartości mikroflory pomiędzy badanymi jaskiniami wynikały bez wątpienia z odmiennych warunków cyrkulacji powietrza. W jaskiniach silnie przewietrzanych, do których należy Jaskinia Okopy Górna i Jaskinia Złodziejska, zawartość mikroflory w powietrzu była około dwukrotnie mniejsza niż w bardzo słabo wentylowanej Jaskini Sąspowskiej i Jamie Ani.

Zawartość mikroorganizmów zależała również od odległości od otworu wejściowego do jaskini. We wszystkich badanych jaskiniach największą ich liczbę obserwowano w najgłębiej położonych komorach i korytarzach. W głębi jaskiń liczebność mikroorganizmów nie wykazywała w przebiegu rocznym większych różnic sezonowych.

Jak dowiodły pomiary zwłaszcza bakterie i promieniowce występowały w środowisku jaskiniowym bardzo licznie. W przypadku bakterii ich obecność w powietrzu jaskini była od kilku do kilkunastu razy większa niż w powietrzu zewnętrznym. Przykładowo w głębi jaskini Sąspowskiej stwierdzono występowanie bakterii na poziomie 4517 jtk/m³ podczas gdy na zewnątrz jaskini było ich 458 jtk/m³. Dla promieniowców te różnice były jeszcze większe. W głębi Jaskini Jama Ani liczebność promieniowców wynosiła 573 jtk/m³ podczas gdy na zewnątrz jaskini było ich zaledwie 13 jtk/m³. Czynnikiem sprzyjającym wzrostowi promieniowców wydaje się być bardzo duża wilgotność jaskiń. Podobne spostrzeżenia przedstawili w swojej pracy Nakaew i in. (2009) znajdując w tajlandzkich jaskiniach wiele rzadkich szczepów promieniowców.

W przypadku grzybów, ich liczebność w powietrzu ojcowskich jaskiń kształtowała się średnio na poziomie 247 jtk/m³ i była porównywalna do liczebności w powietrzu zewnętrznym. Podobne wyniki uzyskał Wang i in. (2010) w chińskiej jaskini Mogao Grottoes gdzie średnia liczebność grzybów wyniosła 187 jtk/m³, natomiast w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie R. Ogórek i A. Lejman (2013) określili liczebność grzybów w powietrzu na dużo niższym poziomie 58 jtk/m³. Czynnikiem niesprzyjającym rozwojowi grzybów w ojcowskich jaskiniach była najprawdopodobniej ubogość środowiska w składniki odżywcze oraz stosunkowo niska temperatura powietrza jaskiniowego.

PODSUMOWANIE

Jak wykazano w badaniach, środowisko przyrodnicze ojcowskich jaskiń charakteryzowało się specyficznymi warunkami mikroklimatycznymi. Cechowała go przede wszystkim ograniczona lub całkowicie odcięta penetracja światła słonecznego, obniżona w stosunku do otoczenia temperatura powietrza z małymi wahaniami w ciągu roku i podwyższona wilgotność. Warunki mikroklimatyczne jaskiń uzależnione były od warunków pogodowych panujących na powierzchni ziemi i zmieniały się wraz z nimi, jednak w znacznie mniejszym tempie. Stosunki termiczno-wilgotnościowe jaskiń kształtowała cyrkulacja powietrza, której intensywność zależała od liczby otworów i przebiegu korytarzy. Przeprowadzone pomiary wykazały różnice warunków mikroklimatycznych pomiędzy badanymi jaskiniami wynikające głównie z ich morfologii. Jaskinie jednootworowe (Jaskinia Sępowska i Jama Ani), charakteryzowały się stabilnym mikroklimatem, natomiast jaskinie posiadające kilka otworów cechowała intensywna wymiana powietrza z otoczeniem, kształtując w ich wnętrzu mikroklimat niestabilny (Jaskinia Złodzijska) bądź dynamiczny (Jaskinia Okopy Górna).

Mikrobiologiczne pomiary powietrza wykazały, że zawartość mikroorganizmów miała związek z odległością od otworu wejściowego i wzrastała w miarę przesuwania się w głąb jaskini. W głębi jaskiń nie stwierdzono większych sezonowych różnic występowania mikroorganizmów. Liczebność mikroflory zależała również od intensywności cyrkulacji powietrza i warunków przewietrzania jaskini. W jaskiniach charakteryzujących się typem mikroklimatu stabilnego (Jaskinia Sępowska, Jama Ani) liczebność mikroorganizmów była prawie dwukrotnie większa niż w jaskiniach z typem klimatu dynamicznego (Jaskinia Okopy Górna). Na ogólną liczbę mikroorganizmów w ojcowskich jaskiniach przypadło średnio 82% bakterii, 11% grzybów i 7% promieniowców. Czynnikiem sprzyjającymi rozwojowi mikroflory była bardzo duża wilgotność jaskiń, stabilna temperatura i słaba wymiana powietrza z otoczeniem. W porównaniu do powietrza zewnętrznego szczególnie licznie w środowisku jaskiniowym występowały bakterie i promieniowce. Liczebność bakterii była tam kilkanaście, a promieniowców kilkadziesiąt razy większa niż w powietrzu zewnętrznym.

PIŚMIENNICTWO

- Ciętak Z. 1935. *Jaskinie południowej części Wyżyny Małopolskiej*. „Ochrona Przyrody”, **15**: 195–242.
- Demel K. 1918. *Fauna jaskiń ojcowskich*. „Sprawozdania z posiedzeń Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Wydział Mat.-Przyr.”, **11**, 4: 623–659.
- Gradziński M. 1995. *Jaskinie Ojcowskiego Parku Narodowego – Dolina Sąspowska, Wąwóz Jamki*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy. Ojców, ss. 92.
- Gradziński M. 1996. *Jaskinie Ojcowskiego Parku Narodowego – Chetmowa Góra*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy. Ojców, ss. 70.
- Gradziński M., Górny A., Szelerewicz M. 1995. *Jaskinie Ojcowskiego Parku Narodowego. Dolina Sąspowska Wąwóz Jamki*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy. Ojców, ss. 92.
- Gradziński M., Michalska B., Szelerewicz M., Wawryka M. 1997. *Jaskinie Ojcowskiego Parku Narodowego. Rusztowa Góra*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy. Ojców, ss. 44.
- Gradziński M., Michalska B., Szelerewicz M., Wawryka M. 1998. *Jaskinie Ojcowskiego Parku Narodowego. Dolina Prądnika. Część południowo-zachodnia*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy. Ojców, ss. 30.
- Gradziński M., Michalska B., Wawryka M. 1999. *Jaskinie Ojcowskiego Parku Narodowego. Dolina Prądnika. Część środkowo-zachodnia*. Wyd. Ojcowski Park Narodowy. Ojców, ss. 31.
- Gradziński M. 2001. *Kras i jaskinie Jury Krakowskiej – zarys problematyki*, [w:] *Badania Naukowe w Południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*, red. J. Partyka. Ojców, s. 40–47.
- Klein J., Niedźwiedz T., Sztylek A. 1965. *Badania mikroklimatyczne na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Ochrona Przyrody”, **31**: 189–201.
- Klein J. 1992. *Mikroklimat jaskini Ciemnej w OPN w warunkach zimowych*. „Prace Muz. Szafera”, **5**: 35–47.
- Kowalski K. 1951. *Jaskinie Polski*, t. I. Wyd. Państwowe Muzeum Archeologiczne. Warszawa.
- Nakaew N., Pathom-aree W., Lumyong S. 2009. *Generic diversity of rare actinomycetes from thai cave soils and their possible use as new bioactive compounds*. „Actinomycetologica”, **23**: 21–26.
- Ogórek R., Lejman A. 2013. *Analiza mikologiczna powietrza w Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. Doniesienie wstępne*. „Episteme” 10/2013; **18**, 3:121–130.
- Podstawczyńska A., Charciarek T. 2002. *Wstępne wyniki badań nad warunkami termiczno-wilgotnościowymi wybranych jaskiń Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prace Muz. Szafera”, **13**: 33–50.
- Pulina M. 1960. *Uwagi o mikroklimacie Jaskini Zimnej na podstawie obserwacji przeprowadzonych w latach 1958–1961*. „Speleologia”, **2**: 2–4.
- Szelerewicz M., Górny A. 1986. *Jaskinie Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*. Wyd. PTTK „Kraj”. Kraków, ss. 200.
- Wang W., Ma X., Ma Y., Mao L., Wu F., Ma X., An L., Feng H. 2010. *Seasonal dynamics of airborne fungi in different caves of the Mogao Grottoes*. Dunhuang, China. „International Biodeterioration & Biodegradation”, **64**: 461–466.
- Wieczorek J. 1992. *Mikroklimat jaskini Łokietka w Ojcowie*. Praca magisterska. Wydział Nauk o Ziemi UŚI. Sosnowiec. Maszynopis, Biblioteka OPN, ss. 151.

Wojkowski J., Olechnowicz-Bobrowska B. 1997. *Przydatność miniaturowych rejestratorów temperatury i wilgotności powietrza do pomiarów środowiskowych*. „Zeszyty Naukowe AR w Krakowie”, 17: 185–189.

Wojkowski J. 2001. *Warunki mikroklimatyczne jurajskich jaskiń*, [w:] *Badania Naukowe w Południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*, red. J. Partyka. Ojców, s. 132–135.

SUMMARY

The article presents the results of microclimatic and microbiological investigations carried out in four caves of Ojców National Park, namely the Jama Ani, Okopy Górna, Sąspowska and Złodziejska Caves. The caves chosen for the study differed in the location in relation to the valley floor, the course and system of corridors, and the number of mouths. The results of measurements revealed microclimatic differences among the studied caves resulting mainly from their morphology. One-entrance caves (Sąspowska and Jama Ani Caves) were characterized by a stable microclimate, whereas the intense air-exchange with the outside observed in the caves with several mouths led to the formation of unstable (Złodziejska Cave) or dynamic (Okopy Górna Cave) microclimates in their interiors. The microbiological air measurements showed that the content of microorganisms was related to the distance from the cave mouth and increased with the cave length and depth. Deep inside the cave no bigger seasonal differences in the microorganism occurrence were found. The quantity of microflora was dependent on the intensity of air circulation and conditions of ventilation within the cave. Compared with the outside air, bacteria and actinomycetes were especially abundant in the cave environment. The quantity of bacteria was there between ten and twenty, and of actinomycetes several dozen larger than in the outside air. The factors conducive to the microflora development were very high humidity and stable temperature within the caves, and slow air exchange with the outside.