

**В.Андрейчук, И.Телешман, П.Куприч****Пространственно-динамические особенности распределения CO<sub>2</sub> в воздухе пещеры Золушка**

Андрейчук В., Телешман И., Куприч П. Пространственно-динамические особенности распределения CO<sub>2</sub> в воздухе пещеры Золушка // Спелеология и карстология, - № 7. – Симферополь. – 2011. С. 15-25.

**Резюме:** Пещера Золушка отличается сравнительно высоким (1-5%) содержанием CO<sub>2</sub> в подземной атмосфере. Источником CO<sub>2</sub> являются процессы окисления органических веществ и метана аммонифицирующими и метан-окисляющими бактериями. Накопление углекислоты в воздухе пещеры обусловлено замедленным воздухообменом с поверхностью. Изучено распределение CO<sub>2</sub> по пространству пещеры в августе 2008 и 2009 годов, проведено сравнение с состоянием вопроса в 1982 году. Установлены закономерности распределения CO<sub>2</sub> из которых главными являются: районно-ступенчатое повышение концентрации газа по направлению от входа в глубину пещеры, а также наличие вертикальной стратификации – возрастание содержания углекислоты в понижениях ходов и колодцах. Проанализировано влияние CO<sub>2</sub> на условия работы в пещере, на организм человека и его психику, предложена интегральная таблица мер предосторожности, которые следует соблюдать при проведении исследований в пещере.

**Ключевые слова:** микроклимат пещер, подземная атмосфера, газовый состав воздуха, содержание CO<sub>2</sub>

Андрейчук В., Телешман И., Куприч П. Пространственно-динамічні особливості розподілу CO<sub>2</sub> у повітрі печери Попелюшка // Спелеологія і карстологія, - № 7. – Симферополь. – 2011. С. 15-25.

**Резюме:** Пещера Попелюшка відрізняється порівняно високим (1-5%) вмістом CO<sub>2</sub> у підземній атмосфері. Джерелом CO<sub>2</sub> є процеси окислення органічних сполук та метану амоніфікуючими та метан-окислюючими бактеріями. Нагромадження вуглекислоти в печері обумовлено сповільненим обміном з поверхнею. Досліджено розподіл CO<sub>2</sub> у печерному просторі у серпні 2008 та 2009 років, виконано порівняння стану питання з 1982 роком. Встановлені закономірності розповсюдження CO<sub>2</sub> з яких найважливішими є: районно-ступінчасте зростання концентрації газу у напрямі від входу в глиб печери, а також наявність вертикальної стратифікації – зростання вмісту вуглекислоти у пониженнях ходів та колодязях. Проаналізовано вплив CO<sub>2</sub> на умови праці в печері, на організм людини та її психіку, запропоновано інтегральну таблицю запобіжних мір, яких належить дотримуватись при проведенні досліджень у печері.

**Ключові слова:** мікроклімат печер, підземна атмосфера, газовий склад повітря, вміст CO<sub>2</sub>

Andreychouk V., Teleshman I., Kouprich P. Spatial-dynamic peculiarities of CO<sub>2</sub> distribution in the air of Zoloushka Cave // Speleology and Karstology, - Vol. 7. – Simferopol. – 2011. – P. 15-25.

**Abstract:** Zoloushka Cave is characterized by relatively high (1-5%) content of CO<sub>2</sub> in its underground atmosphere. The source of CO<sub>2</sub> is the oxidation of organic matter and methane by ammonifying and methane-oxidizing bacteria. The accumulation of carbon dioxide in the cave air is caused by slow air exchange with the surface. The distribution of CO<sub>2</sub> through the cave space has been investigated in August 2008 and 2009 and compared with the CO<sub>2</sub> distribution in 1982. The main regularities of CO<sub>2</sub> distribution in the cave are region-by-region increase in CO<sub>2</sub> concentrations in the direction from the entrance into depth of cave and the vertical stratification – increase of carbon dioxide content in depressions of cave bottom and shafts. The influence of CO<sub>2</sub> on the working conditions in the cave, on the human body and his mind, is also analyzed. The integral table of safety precautions is proposed.

**Keywords:** cave microclimate, underground atmosphere, gas composition of air, CO<sub>2</sub> content

**ВВЕДЕНИЕ**

Пещерный воздух часто отличается повышенным содержанием углекислого газа. Как правило, его источником служат микробиологические процессы,

протекающие в почвах, реже в самих пещерах, а также неорганические процессы, происходящие в более глубоких горизонтах земной коры. В первом случае, углекислый газ поступает в пещерные полости сверху (как более тяжелый), во втором – мигрирует снизу, вместе с углеводородами (метаном и др.), являясь составляющей т.н. «дыхания» земной коры. В обоих случаях пещеры служат естественными ловушками-накопителями газов, в том числе CO<sub>2</sub>. Однако, в силу связи пещерных полостей с поверхностью,

© В. Андрейчук<sup>1\*</sup>, И. Телешман<sup>2</sup>, П. Куприч<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Сілезький університет, Сосновець, Польща

<sup>2</sup> Спелеологічний клуб «Абіс», Кишинів, Молдова

<sup>3</sup> Спелеологічний клуб «Тролодит», Чернівці, Україна

\* Кореспондуючий автор: E-mail: geo@wnoz.us.edu.

воздухообмена с наружной атмосферой, количество накапливающихся газов в пещерах сравнительно невелико и редко превышает 0,5-1,0%. Исключение составляют «замкнутые» подземные полости, пещеры, располагающиеся в специфических природных условиях (вблизи активных разломов, в районах активного вулканизма), а также пещеры, отличающиеся высокой активностью микроорганизмов (с богатыми органикой отложениями). Чаще всего, превалирует один источник, но практически в каждом случае действуют в разной мере и остальные.

Пещера Золушка отличается высоким (1-4% и выше) содержанием  $\text{CO}_2$  и принадлежит, собственно, к сравнительно редкой группе пещер с высоким (более 1%) содержанием углекислого газа. Как было установлено ранними исследованиями (Климчук, Яблокова, Ольштинский, 1984), а также подтверждено в более поздних работах, основным источником  $\text{CO}_2$  в пещере являются процессы окисления органических веществ и метана ( $\text{CH}_4$ ) аммонифицирующими и метан-окисляющими бактериями (Андрейчук, 2007). Особенно активно процессы эти протекали на этапе понижения откачкой уровня водоносного горизонта в гипсах (50-е-70-е годы XX века). В связи с высокой микробиологической активностью организмов, в 70-х и 80-х годах прошлого века содержание  $\text{CO}_2$  в пещере достигало 0,5-2,5%, местами (в понижениях и в наиболее удаленных от входа районах) больше (около 3%). В дальних районах пещеры не горели спички, было трудно дышать, иногда болела голова и даже появлялись звуковые галлюцинации, указывающие на симптомы серьезного углекислотного отравления. По этой причине сокращался период пребывания спелеологов в загазованных районах, а также предпринимались меры, облегчающие функционирование в неблагоприятной среде (снижение физической активности, периодические сессии глубокого дыхания и др.). В целом, упомянутые меры, а также процессы естественной адаптации организма к гиперкапнии и гипоксии (например, учащенное сердцебиение и метаболические), не создавали особых проблем по части пребывания спелеологов в загазованных районах.

В середине 90-х годов (1995-1996 г.) северная стена карьера с вентилирующими пещерными отверстиями и трещинами была погребена под отвалами вскрыши. Воздухообмен пещеры с поверхностью резко замедлился. Связующим пещеру с поверхностью звеном стал 32- метровый бетонный вертикальный колодец со входом на уровне поверхности 4-ой террасы Прута. Следует предполагать, что с этого времени в пещере началось прогрессивное накопление  $\text{CO}_2$ . Однако так ли это было, и до какого уровня возросло содержание  $\text{CO}_2$ , неизвестно, так как ввиду недоступности пещеры (с сентября 1999 по июнь 2005г.) производить в ней наблюдения в то время не представлялось возможным<sup>1</sup>. В это же время (3 октября 1999 года) имел место несчастный случай. Четверо молодых людей из соседнего украинского села Тарасивцы решила проникнуть в пещеру через колодец.

<sup>1</sup> Речь идет о деформации бетонного основания колодца, вследствие чего до 2005 года пещера оставалась закрытой.

Для двоих из них попытка закончилась трагически. Как оказалось, входной колодец был почти на 2/3 своей высоты (глубины) заполнен углекислым газом, концентрация которого, судя по смертельному исходу, превышала, по меньшей мере, 9-10%. Неизвестно, было ли это отражением накопления углекислоты в пещере - вплоть до выполнения ею входного колодца, или – ввиду относительной изоляции пещеры от колодца (деформация основания бетонной колонны, водная изоляция) - являлось результатом временного накопления почвенной углекислоты в колодце, ставшим для нее ловушкой.

С лета 2005 года, после проведения в дне колодца двухмесячных (май-июнь) очистительных и укрепительных работ, пещера вновь стала доступной для посещения. С этого времени и по сегодняшний день в ней отмечается повышенное (по сравнению с уровнем перед закрытием) содержание углекислоты (2-5%), создающее определенные трудности при проведении дальнейших исследований, а также определенную угрозу для здоровья посетителей, прежде всего, спелеологов, работающих в дальних районах.

В связи с этим, авторами предпринята серия повторных исследований площадного распределения  $\text{CO}_2$  в воздухе пещеры, позволившая установить актуальную картину и сравнить ее с состоянием вопроса в 80-90-х годах прошлого века. Этому и посвящена настоящая статья.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерение  $\text{CO}_2$  в пещере производилось с помощью многофункционального немецкого газоанализатора марки Dräger X-am 7000 (рис. 1). В настоящее время прибор широко используется как для научных исследований, так и в горноспасательном деле и находится на оснащении европейских горноспасательных станций. Количество датчиков (25) и высокая индивидуальная (к каждому газу) чувствительность прибора позволяют измерять более 100 различных газов и газодыхательных смесей. Герметичность и прочность делают его весьма



Рис. 1. Общий вид газоанализатора Dräger X-am 7000.  
Fig. 1. General view of Dräger X-am 7000 gas-analyzer.

пригодным для использования в шахтах и подземных выработках, а также в пещерах. Встроенный в прибор насос позволяет (через шланг) втягивать и анализировать воздух с расстояния (глубины) до 45м. Гарантированная чувствительность прибора по отношению к CO<sub>2</sub> составляет 0,1%. Прибор работает на аккумуляторе (20 часов без дозарядки), весит немногим больше килограмма и весьма удобен в проведении замеров.

В августе 2008 и 2009 годов с помощью прибора произведены – по всей площади пещеры - две серии замеров (71 и 64 соответственно). Большинство точек обеих серий покрывалось между собой. Во время второй серии (27-28 августа 2009 года) наблюдениями был охвачен также один из наиболее удаленных западных районов пещеры – Геохимический, не изучавшийся в 2008. Помимо площадных исследований, изучалось также распределение углекислого газа в вертикальном разрезе подземной атмосферы.

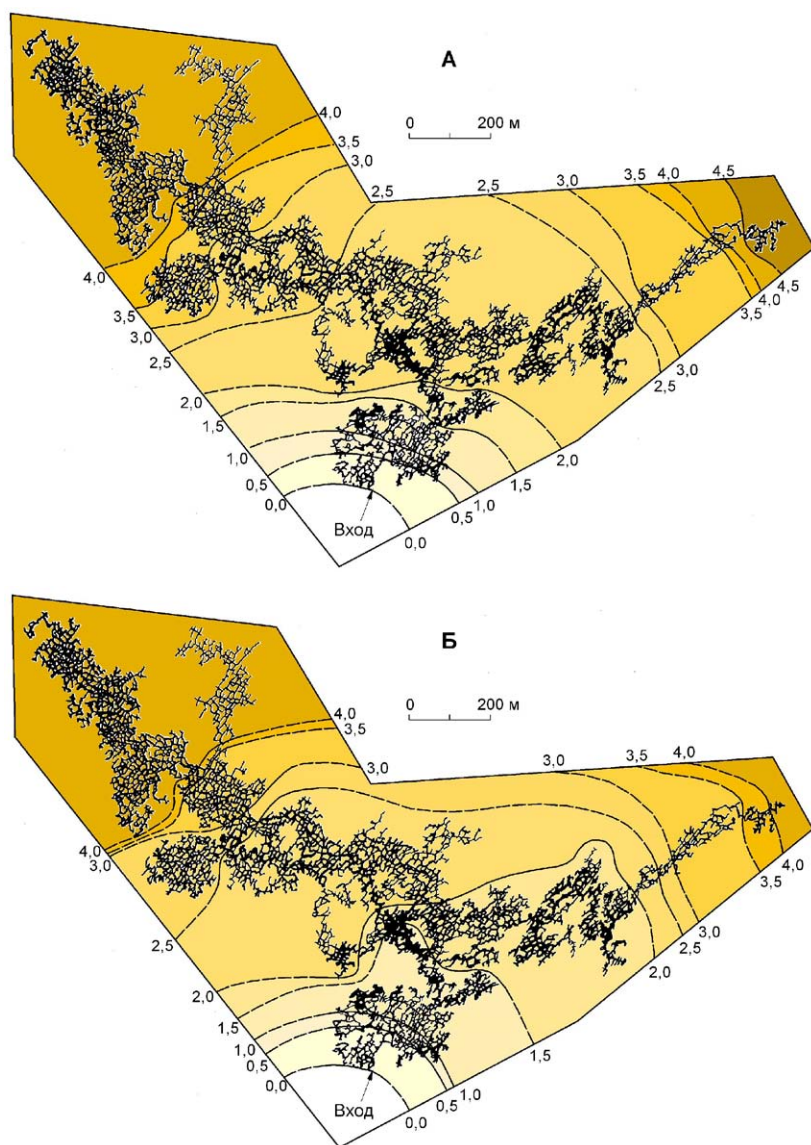


Рис. 2. Концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе пещеры по состоянию на 15-16.08.2008 (А) и 27-28.08.2009 гг. (Б).

Fig.2. CO<sub>2</sub> content in the cave air according to the state of 15-16.08.2008 (A) and 27-28.08.2009 гг. (Б).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактические данные по проведенным газовым съемкам приведены в таблицах 1 и 2. На их основе построены схемы площадного распределения CO<sub>2</sub> по пространству пещеры (рис. 2).

Данные обеих таблиц подтверждают закономерности распределения CO<sub>2</sub> по пространству пещеры, выявленные ранее (Андрейчук, 2007), а именно:

- повышение концентрации CO<sub>2</sub> по направлению от входа в глубь пещеры,
- наличие вертикальной стратификации – возрастание содержания CO<sub>2</sub> в понижениях ходов и колодцах.

В привходовых частях пещеры (0-250 м от входа, районы Привходовый и Заблудших) содержание CO<sub>2</sub> колеблется в пределах 0-1,2%, возрастая вглубь пещеры. В центральных районах и в ближней части восточного крыла, где пещера отличается наибольшими объемами галерей, количество CO<sub>2</sub> изменяется в пределах 1,2-2,5 %, а в крайних западных и восточных районах пещеры, наиболее удаленных от входа, возрастает до 3,0-4,8% (рис. 2). Наиболее высокие значения (4,8%) зарегистрированы в Подвальном подрайоне на западе пещеры и в наиболее удаленном восточном районе – Аляске. Градиент возрастания концентрации CO<sub>2</sub> по мере удаления от входа колеблется в пределах 0,26 - 0,36%/100м. Величина градиента изменяется в зависимости от периода измерений (например, в 2009 году – см. таблицу 2 – он был на несколько сотых ниже, чем в 2008), а также от участка пещеры. Величина градиента при продвижении на запад пещеры составляет 0,34-0,36%/100м, а на восток – 0,26-0,32%/100м. Наблюдаются также определенные скачки градиента – участки его резкого повышения, например, при переходе от ближних участков пещеры (0-100м, уравнивающая микроклиматическая зона) к более удаленным участкам (зона стабильных микроклиматических параметров) (рис. 3).

Скачки градиента наблюдаются также в местах сочленения районов, когда они соединяются одним-двумя ходами. На рис. 3 такие скачки хорошо заметны как в пределах западного вектора продвижения (Стометровка, Факела), так и восточного (Слон, Гать). Они связаны с резкими морфологическими и морфометрическими изменениями при переходе из района в район, когда резко нарушаются

**Таблица 1**Результаты измерения содержания CO<sub>2</sub> в воздухе пещеры Золушка в период 15-16.08.2008

№	Район пещеры	Точка замера	Содержание CO <sub>2</sub> (%)
1	Поверхность	Вход в колодец	0,0
2	Входной колодец	2-я площадка	0,0
3	Привходовый	Дно входного колодца	0,4
4	Привходовый	Морское Око	0,0
5	Привходовый	Поворот на Античный	0,5
6	Заблудших	Проход Окно	1,0
7	Заблудших	Хребет (ОП-2)	1,4
8	Заблудших	Почта	1,0
9	Заблудших	Хребет	1,2
10	Перспектив	Система Д	1,6
11	Перспектив	Поворот к оз. Филипцово	1,8
12	Район Зала Черновицких Спелеологов	Плафон	1,6
13	Район Зала Черновицких Спелеологов	Стадион	1,6
14	Район Зала Черновицких Спелеологов	Каньон	2,0
15	Район Зала Черновицких Спелеологов	Увертюра	1,8
16	Район Зала Черновицких Спелеологов	Начало Зала Черновицких спелеологов - развилка	2,0
17	Район Зала Черновицких Спелеологов	Зал Черновицких Спелеологов (центр)	1,8
18	Район Зала Черновицких Спелеологов	Центральная часть – у стола	2,0
19	Центральный	Сталактитовый кулуар	2,4
20	Центральный	Озеро Сифон	2,4
21	Западный-Анаконда	Западный Перекресток	2,4
22	Западный-Анаконда	Озеро	2,6
23	Западный-Анаконда	Начало галереи Анаконда	2,4
24	Западный-Анаконда	Середина галереи Анаконда	2,6
25	Западный-Анаконда	ОП-14	2,6
26	Западный-Анаконда	Факела	2,6
27	Западный-Анаконда	ОП-16	2,6
28	Веселый	Вход в район Веселый	2,8
29	Веселый	4м ниже дна хода	3,2
30	Веселый	Верхний уровень галереи	2,8
31	Веселый	Безымянная галерея	2,8
32	Веселый	3м ниже верхнего уровня галереи	3,0
33	Веселый	Перед каньоном	3,0
34	Веселый	За Каньоном наверху	3,0
35	Веселый	Черный Каньон	3,6
36	Веселый	Новый район	3,8
37	Голландский Сыр	Высыпка при выходе из района	2,6
38	Голландский Сыр	Развилка	2,8
39	Голландский Сыр	Верхний Ход	3,2
40	Голландский Сыр	3 м ниже Копыта	4,0
41	Голландский Сыр	Копыто	3,4
42	Голландский Сыр	Свежий провал, понижение	4,4
43	Голландский Сыр	Галерея перед ОП-17	3,6
44	Голландский Сыр	ОП-17	4,2
45	Голландский Сыр	Подвалы	4,8

**Продолжение таблицы 1**

№	Район пещеры	Точка замера	Содержание CO <sub>2</sub> (%)
46	Район Зала Черновицких Спелеологов	Зал Выставочный (у воды, 3м ниже днища галереи)	2,2
47	Район Зала Черновицких Спелеологов-Метрополитен	Большая Высыпка (+6м над днищами галерей)	1,8
48	Метрополитен	Начало района Метрополитен (ниже Большой Высыпки)	2,2
49	Метрополитен	Центральная часть района Метрополитен	2,2
50	Озерный	Озеро Наутилус (у воды)	2,2
51	Озерный	Озеро Крокодила (у воды)	2,2
52	Озерный	5 м выше уровня воды в Озере Крокодил	2,2
53	Озерный	Камин (12м выше уровня воды в Озере Крокодил)	2,2
54	Готический	У Большой насыпки перед Залом Динозавра	2,2
55	Готический	Зал Динозавра	2,2
56	Готический	Начало подрайона Колорадо, днище галереи-у воды	2,4
57	Готический	Уступ перед Сухим Колодцем	2,2
58	Готический	Глыба Эверест (Эльбрус)	2,2
59	Восточный	У Мокрого Колодца (Ларисы)	2,4
60	Восточный	Размытый Колодец за Мокрым Колодцем	2,4
61	Восточный	Зал Величественный	2,4
62	Восточный	Шоколадное Окошко	2,6
63	Дальневосточный	Начало Дальневосточного района	2,6
64	Дальневосточный	Центр Дальневосточного района	3,2
65	Дальневосточный	Озеро Четырех	3,8
66	Дальневосточный	Красный Зал	4,4
67	Дальневосточный	Конец Дальневосточного района	4,4
68	Камчатка	Возле ряда насыпок	4,6
79	Камчатка	Баран	4,6
70	Камчатка	Колодец перед районом Аляска	4,8
71	Аляска	Начало района Аляска - каньон	4,8

**Таблица 2**

Результаты измерения содержания CO<sub>2</sub> в воздухе пещеры Золушка в период 27-28.08.2009

№	Район пещеры	Точка замера	Содержание CO <sub>2</sub> (%)
1	Поверхность	Поверхность	0,0
2	Входной колодец	2-я площадка	0,6
3	Входной колодец	Дно колодца	0,0
4	Привходовый	Морское Око	0,0
5	Привходовый	Поворот на Античный	0,0
6	Заблудших	Почта	1,0
7	Заблудших	Хребет	1,4
8	Заблудших	ОП-2	1,4
9	Заблудших	Окно в Европу	1,2
10	Перспектив	Озеро Филиппово	1,6
11	Зала Черновицких Спелеологов	Стадион	1,4
12	Зала Черновицких Спелеологов	Каньон Свиньи	1,6
13	Зала Черновицких Спелеологов	Развилка В-3	1,8

## Продолжение таблицы 2

№	Район пещеры	Точка замера	Содержание CO <sub>2</sub> (%)
14	Зала Черновицких Спелеологов	Зал Черновицких Спелеологов- у стола	1,4
15	Зала Черновицких Спелеологов-Центральный	Стометровка	1,8
16	Центральный	Озеро Студенческое	2,2
17	Центральный	Сталактитовый Кулуар	2,2
18	Центральный- Западный-Анаконда	Западный Перекресток	2,4
19	Западный-Анаконда	Начало Анаконды	2,2
20	Западный-Анаконда	Середина Анаконды	2,4
21	Западный-Анаконда	Шарик Бринеля	2,2
22	Западный-Анаконда	Факела	2,6
23	Голландский Сыр	ОП-16	2,2
24	Голландский Сыр	Развилка Туда-Сюда	2,6
25	Голландский Сыр	Три поворота после Плафона	3,2
26	Голландский Сыр	Поворот на Константинополь	3,0
27	Голландский Сыр	ОП-17	4,0
28	Голландский Сыр	Вход в Подвалы	4,8
29	Геохимический	Первый перегиб после веревки	4,6
30	Геохимический	Соска	4,6
31	Геохимический	Поворот с трассы на Биохим	4,8
32	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,6
33	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,4
34	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,6
35	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,2
36	Геохимический	- 4м у среза воды	4,2
37	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,0
38	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,2
39	Геохимический	Безымянная галерея (верхний уровень)	4,2
40	Геохимический	Колодец (дно колодца -7м)	4,2
41	Геохимический	У Колодца	4,0
42	Геохимический	Старый пикет	4,8
43	Геохимический	Телефон на ОП-18	4,8
44	Голладский Сыр	Выход из 7-го Подвала	4,8
45	Голладский Сыр	4-й Подвал	4,8
46	Зала Черновицких Спелеологов- Метрополитен	Верх высыпки	1,6
47	Метрополитен	Развилка В-3	1,8
48	Озерный	Озеро Наутилус	1,8
49	Озерный	Озеро Крокодил	1,8
50	Озерный	Камин над оз. Крокодил	1,8
51	Озерный- Готический	ОП-6 (Большая Высыпка)	1,8
52	Готический	Зал Динозавра	1,8
53	Готический	Глыба Эверест (Эльбрус)	1,8
54	Восточный	Колодец Ларисы	1,8
55	Восточный	Размытый Колодец	1,8
56	Восточный	ОП-8	1,8
57	Дальневосточный	Слон	2,2

**Продолжение таблицы 2**

№	Район пещеры	Точка замера	Содержание CO <sub>2</sub> (%)
58	Дальневосточный	Кочерга	2,4
59	Дальневосточный	Красный Зал	3,4
60	Дальневосточный-Камчатка	Гать	3,4
61	Камчатка	Баран	3,6
62	Камчатка	Веревка на колодце (2-й поворот)	3,8
63	Камчатка	Верх Водопада	4,0
64	Камчатка	Учкудук	4,0

условия воздухообмена (замедление). Влияние морфометрического параметра отчетливо проявляется в пределах обоих «крыльев» пещеры. Так, на участке от Зала Черновицких Спелеологов и до самих Факелов, где сети ходов подобны и располагаются более-менее на одном уровне, кривая содержания CO<sub>2</sub> растет очень медленно. Еще более выражен этот эффект на востоке пещеры. Начиная от крупных галерей восточной части Метрополитена и вплоть до пределов Восточного района (650м по прямой !) содержание CO<sub>2</sub> практически не изменяется, образуя «плато». Но в месте сочленения морфологически и морфометрически контрастирующих районов, например, Зала Черновицких Спелеологов и Центрального, Западного-Анаконда и Голландского Сыра, Восточного и Дальневосточного и т.д., кривая содержания делает резкий скачок вверх.

Приведенные факты указывают, что возрастание концентраций CO<sub>2</sub> по мере удаления от входа объясняется, прежде всего, плохой естественной вентиляцией глубинных частей лабиринта. Несколько повышенные содержания CO<sub>2</sub> в западных районах, по сравнению с восточными, могут быть объяснены морфометрическими причинами: объемы галерей западных районов в 2-6 раз меньше, чем восточных, что предопределяет в них более застойный режим воздухообмена.

Сравнение таблиц 1 и 2, а также рисунков 2-А и 2-Б показывает, что в 2008 году концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе пещеры была незначительно выше, чем в 2009. Особенно это видно на примере центральной части пещеры. В августе 2008 года на большей ее части, включая районы к западу и востоку от Зала Черновицких Спелеологов, преобладали концентрации 2,0-2,5% (рис. 2-А), а год спустя такие концентрации

были характерны только для районов к западу от упомянутого зала (рис. 2-Б). Из этого сравнения, правда, трудно сделать более конкретный вывод, чем тот, что характер распределения концентраций CO<sub>2</sub> по полю пещеры время от времени изменяется, однако общие закономерности сохраняются.

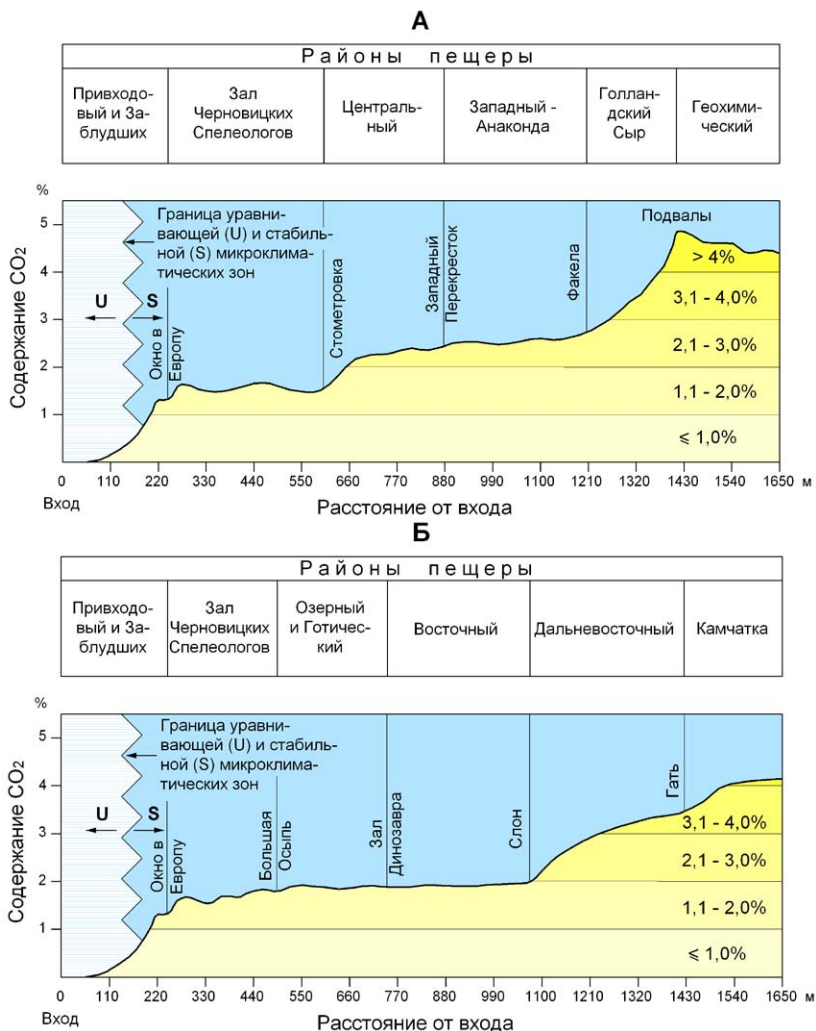


Рис. 3. Возрастание концентрации CO<sub>2</sub> по мере продвижения от входа в глубь пещеры по данным измерений 27-28.08.2009 года: А – при продвижении в западную часть пещеры, Б – при продвижении в восточную часть. Fig. 3. Increase in CO<sub>2</sub> concentrations in the direction from epy entrance into depth of the cave according to the measurements in 27-28.08.2009: А – direction from the center to the western part of the cave, Б - direction from the center to the eastern part of the cave.

Для распределения  $\text{CO}_2$  в вертикальном разрезе характерно его накопление в наиболее низких (гипсометрически) участках лабиринта – в глубоких трещинах, колодцах, днищах ходов среднего яруса, в „подвальном” ярусе (Андрейчук, 2007). Это обусловлено большим молекулярным весом  $\text{CO}_2$  в сравнении с обычной воздушной смесью. В днищах наиболее глубоких трещин и колодцеобразных углублений концентрация  $\text{CO}_2$  может достигать 5-6% и более, представляя существенную опасность для исследователей. Вертикальный градиент возрастания концентрации  $\text{CO}_2$  в направлении сверху вниз колеблется в широких пределах от 0,1 до 1,0%/м. В объемных районах он существенно ниже, чем в малообъемных, замкнутых. Следует, однако, помнить, что использование понятия градиента при определении вертикальной изменчивости  $\text{CO}_2$  имеет весьма условный характер. Физически, чаще всего имеет место ситуация резкого скачка – возрастания концентрации при переходе от одного морфологического элемента пещеры, например, днища галереи, к другому – понижению, колодцу и т.д. При этом, положение границы не обязательно коррелирует с морфологической границей. Зона резкого увеличения концентрации может располагаться и в середине, и на дне колодца или углубления. Нельзя говорить также об определенном высотном уровне высоких концентраций  $\text{CO}_2$  в пещере. Ввиду разобщенности углублений и колодцев глинистыми отложениями, накопление  $\text{CO}_2$  в понижениях носит выраженный участковый, локальный характер. Это делает невозможным какое-либо прогнозирование его содержания в разных местах и на разных уровнях пещеры. В каждом конкретном случае колодца или глубокого понижения нужны конкретные измерения.

## ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ

Проведенные исследования показывают, что концентрация углекислоты в воздухе пещеры в 2008 и в 2009 годах была значительно (в 1,5-2,0 раза) выше, чем в 80-х годах прошлого века (рис. 4).

Для выяснения причин этого обстоятельства можно проанализировать две версии. Согласно первой - морфодинамической – повышение концентрации может быть объяснено ухудшением, по сравнению с 80-ыми годами, воздухообмена пещеры с поверхностью. В 80-е и в начале 90-х годов пещера еще вентилировалась через зияющие трещины и входы в карьере, даже если они не были непосредственно с нею связаны. По мере закрытия вентилирующей стены отвалами, а затем технической аварии в колодце, условия воздухообмена резко ухудшились. В настоящее время пещера связана с поверхностью только единственным 32-метровым

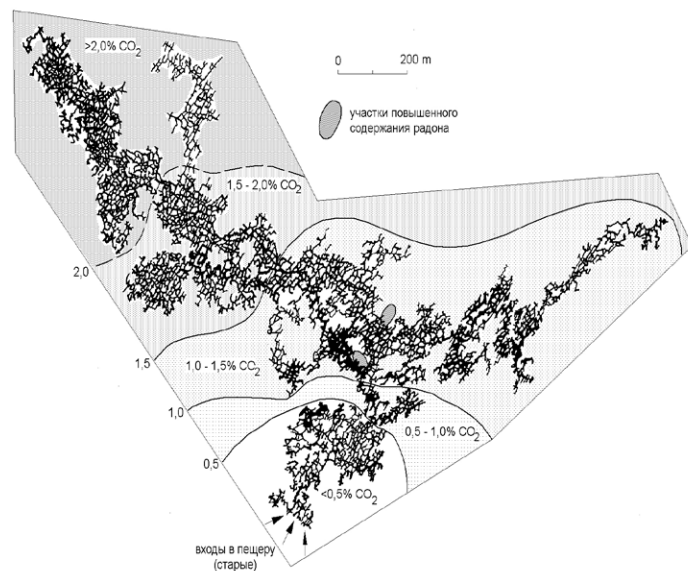


Рис. 4. Концентрация углекислого газа в воздухе пещеры по состоянию на ноябрь 1982 (Андрейчук, 2007).

Fig.4.  $\text{CO}_2$  content in the cave air as for November 1982 (after Andreychouk, 2007).

вертикальным колодцем, расположенным над нею. Такая структура воздухопроводящей сети однозначно неблагоприятна для активного воздухообмена, особенно, по отношению к более тяжелому, чем воздух, углекислому газу. Следовательно, повышение концентрации  $\text{CO}_2$  является следствием застойного режима воздухообмена, наступившего после изоляции пещеры от карьера.

По второй версии – микробиологической - нельзя исключать также дальнейшей высокой активности микроорганизмов, в том числе метанооксиляющих бактерий. Хотя пещера медленно «усыхает» (речь идет, прежде всего, о ее глинистых отложениях), 100%-ная влажность воздуха и стабильный микроклиматический режим благоприятствуют дальнейшему протеканию микробиологических процессов, сопровождающихся выделением углекислоты, а также метана, который также окисляется с образованием  $\text{CO}_2$ . В пользу этой версии свидетельствует факт обнаружения в пещерном воздухе во время съемки в августе 2009 года определенных (0,1-0,5%) количеств  $\text{CH}_4$ . Наиболее правдоподобным представляется комбинированный сценарий, предполагающий определенную микробиологическую активность пещерных образований, продуцирующих  $\text{CO}_2$ , с одной стороны, и его накопление - в силу обстоятельств воздухообмена – с другой. Близкие уровни и аналогичный характер распределения  $\text{CO}_2$  во время замеров 2008 и 2009 годов может свидетельствовать о некоторой стабилизации, отражающей современную картину динамического равновесия между продуцированием  $\text{CO}_2$  и воздухообменом (естественной вентиляцией).

Сценарий этот не учитывает, правда, еще одного фактора, который может оказаться весьма существенным – нисходящего поступления  $\text{CO}_2$  из почвы по обвальным трубам. Чтобы оценить вклад этого фактора, который, несомненно, присутствует, нужны специальные исследования.



Что касается общего уровня и площадной динамики содержания CO<sub>2</sub> в пещере по сезонам и т.д., то здесь нужны дополнительные исследования. Сезонная динамика наверняка присутствует в годичном разрезе концентраций, поскольку в пещере проявляется определенная сезонная динамика воздухообмена, в частности, смещение границы уравнивающей (переходной) и стабильной микроклиматической зон.

Еще менее изученным является вопрос влияния на содержание CO<sub>2</sub> колебаний уровня пещерных водоемов. Замечено, что при подтоплении пещеры, подрайона Подвалов, например, в подтопленных районах дышится несколько легче, т.е. концентрация углекислоты снижается на несколько десятых – до одного процента. Это может быть связано с поглощением CO<sub>2</sub> из воздуха водным зеркалом, так как между содержанием углекислоты в воздухе и воде обычно устанавливается динамическое равновесие. Этот чрезвычайно интересный вопрос требует целевых газо- и гидрохимических исследований.

### ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

По немецким нормам концентрация углекислого газа свыше 1% в горных выработках уже представляет некоторую («сигнальную») опасность для здоровья шахтеров и на этот случай имеются соответствующие предписания. Прибор, которым производились измерения, начинает при превышении 1% издавать пронзительный звуковой сигнал. Медицинские исследования показывают, что имеются определенные адаптивные пределы устойчивости организма по отношению к гиперкапнии и гипоксии. При невысоких содержаниях CO<sub>2</sub> (и соответственно – пониженном на такую же величину содержании O<sub>2</sub>) – до 1%, организм легко справляется с избытком CO<sub>2</sub>, слегка активизируя свой метаболизм. При более существенных концентрациях CO<sub>2</sub> (и, соответственно, недостатке O<sub>2</sub>) – в пределах 1-3% – в организме включаются специфические компенсационные (адаптационные) механизмы, которые позволяют в течение определенного времени (хватает нескольких часов) приспособиться к условиям среды, не испытывая при этом выраженного дискомфорта. Если же концентрация углекислоты достигает 3-5%, компенсаторные возможности организма оказываются недостаточными, чтобы в течении короткого (5-10 часов) периода пребывания в пещере он мог эффективно приспособиться к условиям среды. Дискомфорт становится весьма выраженным, учащается сердцебиение, появляется частое поверхностное дыхание, тяжелая одышка, головная боль, иногда даже галлюцинации и потеря сознания. Длительное (больше 3 часов) пребывание в таких условиях является для организма сильным физиологическим стрессом и может (при низких адаптационных возможностях) составлять определенную угрозу для здоровья.

В Золушке наблюдается довольно широкий диапазон концентраций CO<sub>2</sub> – от 0 до почти 5%. Весьма вероятно, что в глубоких колодцах и трещинах дальних районов, содержание углекислоты может существенно превышать 5%-ый рубеж. Это значит, что пещера, на значительной части своей площади,

является средой, в разной степени неблагоприятной для жизнедеятельности человека. В этом плане можно различать три аспекта неблагоприятности: физический (физической переносимости), физиологический (медицинский) и психический.

*Физический аспект.* Как отмечалось выше, по мере возрастания концентраций CO<sub>2</sub> – при продвижении вглубь пещеры – нарастает степень физического дискомфорта пребывания в ней. Возрастание дискомфорта происходит не пропорционально, а скорее экспоненциально. При концентрациях CO<sub>2</sub> до 2,0-2,5% дискомфорт практически не ощущается, организм легко справляется с небольшим избытком углекислоты. Начиная же от 2,5-3,0%, «кривая дискомфорта» резко изгибается вверх<sup>2</sup>. После 3,5-4,0% появляются выраженные симптомы углекислотного отравления, описанные выше. Отталкиваясь от приведенных цифр, пространство пещеры можно разделить по условиям пребывания в ней (степени комфортности) на три условные зоны (таблица 3): *комфортную* (содержание CO<sub>2</sub> до 1%), *условно комфортную* (до 2,5-3,0%) и *дискомфортную* (выше 3,0%).

*Медицинский аспект.* Здесь должны сказать свое веское слово специалисты-медики. Ограничимся лишь общими замечаниями, проистекающими из общеизвестных положений, а также из результатов проведенных в пещере специальных исследований (Гипоксически-гиперкапнические тренировки..., 2007).

Наличие углекислого газа в пещере позволяет определять ее атмосферу как гипоксически-гиперкапническую. Это значит, что на организм человека в пещере действуют одновременно два фактора ее газовой среды: избыток углекислого газа, ведущий к гиперкапнии (или гиперкарбии), т.е. углекислотному отравлению, и недостаток кислорода, приводящий к гипоксии, т.е. к кислородному голоданию. Это отличает пещерную среду от среды высокогорья, где отмечается только пониженное содержание O<sub>2</sub> (гипоксия). Оба фактора в организме человека характеризуются тесной взаимосвязью (метаболической) и разделить их влияние довольно трудно. Соотношение упомянутых факторов в пещерной среде Золушки позволяет предполагать, однако, что более существенное значение имеет повышенное содержание CO<sub>2</sub>, так как организм быстрее реагирует на его присутствие, чем на такой же (в процентном отношении) дефицит O<sub>2</sub>.

Известно, что организм человека довольно хорошо адаптируется к небольшим концентрациям CO<sub>2</sub> и нехватке кислорода, располагая целым арсеналом механизмов компенсации на системном, тканевом, клеточном и субклеточном уровнях. Чем сильнее воздействие, тем большее число механизмов и уровней оказывается задействованным в адаптационном процессе, и тем большее время требуется для устойчивой стабилизации режима функционирования организма. Предельными, за которыми следует

<sup>2</sup> Указание предела значений связано с субъективным характером ощущений и разной индивидуальной чувствительностью к гиперкапнии.

**Таблица 3**

Зонирование пещеры по условиям влияния газовой среды на человека

Индекс зоны	Пределы содержания CO <sub>2</sub> в %	Степень комфортности пребывания в пещере	Угроза для здоровья спелеологов	Меры предосторожности
А	0,0-1,0	Комфортная	Отсутствует	- не требуются
В	1,1-2,5	Условно комфортная	Слабая	- ограниченное пребывание в районе (уменьшение на 1 час на каждые 0,5% концентрации, но в целом не более 8-10 часов) - периодический отдых и физическое расслабление - горячее питье (термос)
С	2,6-5,0	Дискомфортная	Средняя	- ограниченное пребывание в районе (до 1-5 часов, прогрессивное уменьшение пропорционально росту концентрации CO <sub>2</sub> ) - избегание значительных физических нагрузок - глубокое дыхание - частый отдых - частое питье (небольшими порциями)

смертельный исход, концентрациями газов в атмосфере являются для CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> 10% : для CO<sub>2</sub> - превышение этой величины, а для O<sub>2</sub> – снижение<sup>3</sup>.

Учитывая величину и соотношение концентраций углекислоты и кислорода, говорить о выраженном вреде пребывания спелеологов в пещере нет оснований. Более того, специальными исследованиями черновицких спелеологов-медиков установлено, что пребывание человека в пещере на протяжении более 4 часов в условиях «средней» загазованности (около 2,5% CO<sub>2</sub>), стимулирует адаптационные процессы и может быть использовано в тренировочных, а в случае некоторых заболеваний, реабилитационных и лечебных целях (Бобылев, 1997, Бобылев, Билецкий, 1999; и др.).

При содержании CO<sub>2</sub> выше 3% и кратковременности (5-8 часов) пребывания в загазованных районах, организм, однако, испытывает физиологический стресс и не успевает адаптироваться к неблагоприятным условиям. К тому же, происходит наложение действия гиперкапнии и гипоксии. Такая «встряска» для организма может иметь как положительные, так и отрицательные последствия – в зависимости от индивидуальной чувствительности организма, а также наличия определенных заболеваний. Страдают в этом случае, прежде всего, нервная система (мозг), а также сердечно-сосудистая.

*Психический аспект.* Еще менее однозначно воздействие гипоксически-гиперкапнической среды пещеры на психику спелеологов. Каких-либо специальных исследований в этом направлении в пещере не производилось. Тем не менее, базируясь на многолетнем опыте посещения пещеры, авторском,

прежде всего, проблема эта может быть обозначена как таковая. Ограничимся несколькими рефлексиями на этот счет.

В первые годы изучения (картирования) пещеры, при длительном пребывании в дальних загазованных районах, особенно западного «крыла» пещеры, у спелеологов, наряду с типичными реакциями углекислотного отравления как-то: частое поверхностное дыхание, учащенный сердечный ритм, головная боль, тошнота, доходило до некоторой «мозговой вялости» (тугости соображения), а также появления галлюцинаций, прежде всего, звуковых.

Еще один аспект влияния CO<sub>2</sub> на психику. При работе в загазованных районах ощущается определенный психический дискомфорт. Он проявляется в наличии скрытого желания «не задерживаться здесь особенно долго». В случае группового пребывания (3-4 человека – съемочная группа) это желание, как правило не озвучивается. Но в случае одиночных посещений желание это проявляется значительно сильнее и провоцирует разнообразные (индивидуальные, обстоятельственные) формы поведения: от существенного сокращения планируемого времени пребывания в районе до появления панического страха и панического бегства (дословно) из района.

Понятно, что психические реакции человека в пещерах на тот или иной фактор воздействия несут весьма выраженный индивидуальный характер. Тем не менее, отмеченные выше факты признаются большинством спелеологов, работающих в Золушке. Авторы сами неоднократно переживали описанные состояния в разных формах.

Отмеченные выше аспекты-обстоятельства влияния CO<sub>2</sub> на спелеологов должны учитываться при проведении спелеологических исследований. Ниже приведена таблица, синтезирующая аспекты влияния газовой среды Золушки на человека и содержащая общие рекомендации по устранению или минимализации его неблагоприятных последствий (таблица 3).

<sup>3</sup> Организм человека нормально функционирует при уровне кислорода выше 16%. Первые симптомы гипоксии могут возникать при 14%. Потеря же сознания от недостаточного содержания кислорода обычно возникает при превышении 10% порога. Симптомы углекислотного отравления появляются уже при концентрациях 3-4% CO<sub>2</sub>.

В качестве предохранительных мер весьма желательно также следовать ниже-приведенным рекомендациям:

Выбираясь в дальние, сильно загазованные районы необходимо иметь при себе портативный прибор для измерения концентрации CO<sub>2</sub>.

При схождении в колодцы необходимо предварительно проверять содержание CO<sub>2</sub> в них (опуская засасывающий шланг). Если концентрация CO<sub>2</sub> в колодцах превышает 5% спускаться в них не рекомендуется вообще или спуск должен осуществляться с небольшим кислородным баллоном в присутствии страхующего.

При составлении плана пребывания в пещере и определении срока нахождения в ней необходимо руководствоваться предписаниями таблицы 3.

При сильно выраженных симптомах гиперкапнии (частое сердцебиение, сильная одышка, ощущение нехватки воздуха, головная боль, паморочливое состояние) необходимо немедленно переместиться в менее загазованную зону.

Посещать сильно загазованные (более 3% CO<sub>2</sub>) районы следует только в группе (не менее 2 человек).

## ЛИТЕРАТУРА

Андрейчук В.Н. Пещера Золушка. Сосновец-Симферополь, 2007. - 407 с.

Бобилев О.В. Обґрунтування використання клімату карстових печер з гіпоксично-гіперкапічним газовим середовищем з реабілітаційними цілями. Автореф. дис....канд. мед.наук. Одеса, 1997. – 24 с.

Бобылев А.В., Билецкий С.В. Возможности использования микроклимата пещеры Золушка для профилактики и лечения гипертонической болезни (ГБ). В: Оздоровчі ресурси Карпат і прилеглих районів: Матеріали конференції з міжнародною участю, 5-6 жовтня. Чернівці, 1999. – С. 210-211.

Гипоксически-гиперкапнические тренировки в кардиологии. Ред. проф. Билецкий С.В. и проф. Гоженко А.И. Черновцы, 2007. – 147с.

Климчук А.Б., Яблокова Н.Л., Ольштинский С.П. Формирование газового состава воздуха карстовых пещер Подолии и Буковины. В: Докл. АН УССР.-Сер. Б. 1984.-№2. – С.19-22.