



ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДИНАМИКУ СОДЕРЖАНИЯ CO₂ В ПРЕДЕЛАХ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА (НА ПРИМЕРЕ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ)

А. В. Краси́ков, А. С. Казанцева

Горный институт УрО РАН, Пермь; *Alexeykrasikov55@gmail.com*

Мониторинговые наблюдения за изменением концентрации углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере проводились в период с сентября 2017 г. по февраль 2019 г. Углекислый газ является важным компонентом исследования газового состава пещеры, поскольку его повышенные значения могут оказаться опасными для человека. Постоянный контроль позволяет избежать негативных последствий и предпринять меры для их предотвращения.

Настоящая работа представляет обобщенный анализ показателей, влияющих на концентрацию углекислого газа в подземном пространстве. В ходе исследований выделены основные (температурный режим на поверхности и в пещере) и второстепенные (давление в пещере, трещиноватость, минерализация воды) факторы, влияющие на динамику содержания углекислого газа в гротах. Проведена корреляционная оценка между вариациями CO₂, микроклиматическими параметрами (температура на поверхности и в пещере, давление в пещере) и минерализацией воды озер. В зимний и летний периоды 2019 г. в разных микроклиматических зонах пещеры выполнены разовые замеры скоростей воздушных потоков, рассчитаны коэффициенты трещиноватости массива Ледяной горы в пределах развития пещеры и расходы воздуха для установления связи между концентрацией углекислоты, расходом воздуха и трещиноватостью массива.

Ключевые слова: Кунгурская Ледяная пещера, углекислый газ, температура воздуха, динамика CO₂, трещиноватость горных пород.

FACTORS INFLUENCING DYNAMICS OF CO₂ CONTENT WITHIN THE UNDERGROUND SPACE (THE CASE OF KUNGUR ICE CAVE)

A. V. Krasikov, A. S. Kazantseva

Mining institute UB RAS, Perm; *Alexeykrasikov55@gmail.com*

Monitoring of changes in carbon dioxide concentration in the Kungur Ice cave was conducted from September 2017 to February 2019. Carbon dioxide was an important component of the gas composition of the cave, since its elevated values during excursion activities could be dangerous to human life. Constant monitoring allows to avoid negative consequences and take measures to prevent them.

This paper presented a generalized analysis of factors that affect the concentration of carbon dioxide in the underground space. In the course of the research, the main (temperature conditions on the surface and in the cave) and secondary (pressure in the cave, fracturing, mineralization of water) factors influencing the dynamics of carbon dioxide content in the grottoes were identified. A correlation estimate was made between CO₂ variations, microclimatic parameters (surface and cave temperatures, pressure in the cave) and lake water mineralization. In winter and summer periods of 2019, one-time measurements of air flow velocities were carried out in different microclimatic zones of the cave, fracture coefficients of the massif of Ledyanaya gora within the development of the cave and air flow were calculated to establish a relationship between carbon dioxide concentration, air flow and mass fracture.

Keywords: Kungur Ice Cave, carbon dioxide, air temperature, CO₂ dynamics, fracturing of rocks.

Введение

Известно, что содержание углекислого газа в подземном пространстве на порядок отличается от его содержания в атмосфере (от 250 до 400 ppm). Например, содержание CO₂ в пещере Шульган-Таш — до 400 ppm [7], в Новоафонской пещере — от 200 до 5000 ppm [8], в пещере Золушка колеблется от 100 до 50000 ppm [1].

Ранее изучением газового состава воздуха в Кунгурской ледяной пещере занимались В. Н. Дублянский (1980-е гг.), Н. Л. Яблокова, А. Б. Климчук (1987, 1991) [5]. По результатам их работ можно сделать вывод, что изучение газового состава воздуха, особенно содержание и динамика углекислого газа, позволит определить условия и особенности происхождения и развитие многих процессов (например, гидрогеохимических), происходящих в карстовых полостях.

Наблюдения за содержанием углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере необходимы, поскольку она является объектом массового туризма и повышенные концентрации CO₂ (> 5000 ppm) могут представ-

лять опасность для жизни. С каждым годом количество посетителей увеличивается (например, в 2017 г. пещеру посетило 105 тыс. чел, в 2018 — 129 тыс. чел.) и повышается количество выдыхаемой углекислоты. Вопрос о влиянии количества посетителей на изменение концентрации CO₂ в пещере рассмотрен в предыдущей работе [4]. Максимальные концентрации CO₂ в пещере (до 1500 ppm) возникают в летний период (июль) после посещения около 2 тыс. человек за сутки. Углекислый газ тяжелее атмосферного воздуха, при дыхании он концентрируется сначала в верхних слоях воздуха грота, путем диффузии постепенно опускается и накапливается в нижней части грота. Такое движение характерно для всех гротов пещеры.

Пещера представляет собой сложную систему гротов и соединяющих их более узких проходов с несколькими входами на разных высотных уровнях. Движение воздуха происходит под влиянием естественной тяги, за счет разностей плотностей наружного и пещерного воздуха. На основе существующего регламента проветривания [2] сотрудниками ста-

ционара проводится регулирование естественного воздушного потока в пещере и используются 2 режима проветривания из 4 возможных. В летнее время в пещере используется режим проветривания, при котором во входном и выходном тоннелях шлюзовые двери закрыты. В зимнее время используется режим проветривания, когда двери входного шлюза открыты, а двери выходной шлюзовой части закрыты. Интенсивность воздуха, по данным воздушно-депресссионной съемки, зависит от разницы температур на поверхности и внутри пещеры, давления в гротах, от размеров галерей и структурно-текстурных особенностей массива, в котором заложены гроты пещеры (трещиноватость) [3]. Для Кунгурской ледяной пещеры характерно образование на поверхности озер кальцитовых пленки. Средняя минерализация воды составляет 2,2 г/дм³. Состав воды сульфатно-кальциевый. В летний период при испарении воды из озер увеличивается общая минерализация воды, а на поверхности озер растет концентрация растворенного CaCO₃. Формированию кальцитовых пленок способствует выделение углекислоты из воды.

Цель работы заключалась в анализе природных факторов, влияющих на динамику изменения концентрации углекислого газа в пределах подземного пространства Кунгурской ледяной пещеры.

Методика работ

Для исследования изменения содержания CO₂ был установлен датчик CORA (U-Logger CO₂ 12/2011 SNr: 35; Austria) с интервалом измерений 60 мин. На сегодняшний день устройство контроля CORA — один из самых точных приборов (± 50 ppm, погрешность в пределах 3 %), который был специально разработан для мониторинга двуокиси углерода в условиях пещеры [10]. Интервал измерения 60 мин. (один замер) позволяет вести непрерывные замеры CO₂ в течение месяца. Увеличение количества измерений до четырех замеров в час сокращает работу прибора до одной-двух недель.

С сентября 2017 г. по февраль 2019 г. датчик для измерения концентраций углекислого газа был установлен в гроте Дружбы Народов в 700 м от входовой части (зона постоянных положительных температур). Выбор места установки прибора связан с тем, что грот Дружбы Народов расположен в центральной части пещеры в зоне постоянных положительных температур и её изменения от среднего значения минимально. На фоне этого фактора возможно оценить влияние других параметров, которые влияют на динамику углекислоты не так значимо. Озеро, расположенное в гроте, также дает нам возможность оценить влияние минерализации озерной воды на содержание CO₂. В периоды паводка и межени в 2017—2018 гг. был выполнен отбор проб воды из озера в гроте Дружбы Народов.

В 2019 году были проведены измерения концентраций углекислоты в зимний и летний периоды в разных микроклиматических зонах. Замеры были выполнены в 12 гротах с интервалом 15 мин в течение 6 часов. Данные исследования позволили проследить изменение концентрации CO₂ в точках замера при смене температурного режима и режима проветривания в пещере.

Во время наблюдений фиксировались основные метеопараметры: температура на поверхности, температура и давление в пещере. Данные о температуре воздуха на поверхности были получены с помощью метеостанции Meteoscan pro 923 (Termometerfabriken Viking AB, Швеция), установленной на базе Кунгурской лаборатории-стационара. Температура в гротах пещеры измерялась ртутными термометрами и автоматическими датчиками НОВО Water Temp Pro v2 (Onset Computer Corporation, США).

Оценка связи между трещиноватостью массива горных пород и концентрацией углекислого газа проводилась с использованием двух расчетных коэффициентов трещиноватости (площадной удельной трещиноватости и объемного коэффициента трещиноватости). Первый коэффициент представляет собой отношение общей длины трещин (м) к площади изучаемого участка (грот, м²). Второй — отношение количества всех трещин грота (шт.) к его объему (м³). Для структурного картирования были использованы тахеометры Leica TCR800 и Sokkia CX 106. Трещиноватость массива оценивалась для каждой точки замера путем картирования и подсчета количества трещин на всей площади грота и вычисления их общей протяженности в этом гроте. Полученные данные были обработаны и преобразованы в графический вид с помощью системы автоматического проектирования и черчения AutoCAD.

Фиксировались трещины, которые хорошо выражены в массиве горных пород, протяженностью от 0.15 до нескольких десятков метров.

По результатам воздушно-депресссионной съемки проводился анализ зависимости концентрации углекислого газа от расхода воздушного потока [2]. Для расчёта распределения воздуха и определения скорости воздушного потока использовались анемометры АПР-2 и Testo 417. Расход рассчитывался путем замера скорости воздушного потока, проходящего через сечение за одну минуту, в котором производился замер содержания CO₂.

Взаимосвязь между содержанием углекислого газа и выделенными факторами (температура на поверхности и в пещере, давление в пещере, минерализация воды озер) оценивалась путем расчёта коэффициента корреляции Пирсона (r). Корреляция определяется как очень сильная при $r > 0.8$, сильная при $r = 0.6—0.8$, умеренная при $r = 0.4—0.6$, слабая и очень слабая при $r < 0.4$ [9]. Для оценки значимости корреляции рассчитанные значения r сравнивались с критическими значениями, соответствующими уровню значимости $\alpha = 0.05$ при числе степеней свободы $df = n - 2$. Чем сильнее корреляционная зависимость между фактором и CO₂, тем выше его значимость. По данному параметру были выделены основные и второстепенные факторы, влияющие на динамику содержания CO₂ в пещере.

Результаты и обсуждение

Концентрация углекислого газа в гроте Дружбы Народов за полуторагодовой период изменялась от 255 до 1367 ppm. Максимальные значения CO₂ в пещере (>1000 ppm) характерны для летне-осеннего периода (июль — сентябрь), минимальные значения — для зим-



Таблица 1. Минимальное и максимальное содержание CO₂ в гроте Дружбы Народов
Table 1. The minimum and maximum CO₂ content in the Druzhby Narodov grotto

Период / Period	Концентрация CO ₂ , ppm / CO ₂ concentration, ppm	
	min	max
Зимний / Winter	255	592
Весенний / Spring	266	796
Летний / Summer	511	1269
Осенний / Fall	271	1367

Таблица 2. Корреляция между содержанием углекислого газа (CO₂) и температурой (T)
Table 2. Correlation between carbon dioxide (CO₂) content and temperature (T)

	CO ₂ -T _{пещеры} (cave)	Корреляция Correlation	CO ₂ -T _{поверхности} (surface)	Корреляция Correlation
n =	394	Значимая / Valuable	394	Значимая / Valuable
r _{crit} =	0.105		0.105	
r =	0.627		0.723	
R ² =	0.39		0.52	

Примечания: n — количество измерений, r_{crit} — критическое значения коэффициента корреляции Пирсона, R² — коэффициент детерминации.

Notes: n — number of measurements, r_{crit} — critical value of the Pearson correlation coefficient, R² — coefficient of determination.

него периода (300 ppm; табл. 1). Динамика изменения концентраций углекислоты соответствует ходу изменения температуры как на поверхности, так и в пещере (рис. 1). Отмечается сильная корреляция количества углекислого газа как с температурой на поверхности (r = 0.7), так и с температурой в гроте Дружбы Народов (r = 0.6; табл. 2). Между изменением давления воздуха в гроте и CO₂ зависимости не выявлено (r = -0.2), хотя по графику видно, что в периоды пиковых значений давления воздуха количество углекислоты в течение двух-трех дней уменьшалось. В январе 2018 г. при максимальном значении давления (1021 mBar) концентрация углекислого газа составила 255 ppm, при минимальном значении давления (994 mBar) — 1337 ppm.

Результаты химического анализа озерной воды в гроте Дружбы Народов показали, что максимальное количество кальцита (CaCO₃) формируется в летне-осенний период (рис. 2), когда значения минерализации воды (2.1–2.2 г/дм³) и концентраций CO₂ (1300–1350 ppm) достигают своего максимума, что подтверждается предыдущими исследованиями [6]. Корреляционная зависимость между общей минерализацией воды, а также концентрацией ионов Ca²⁺ и HCO₃⁻, содержащихся в озере грота, и концентрацией углекислого газа, содержащегося в подземной атмосфере, очень слабая (r = 0.21 при R² = 0.05) и статистически незначимая при r_{crit} = 0.63. При увеличении концентрации этих ионов происходит постепен-

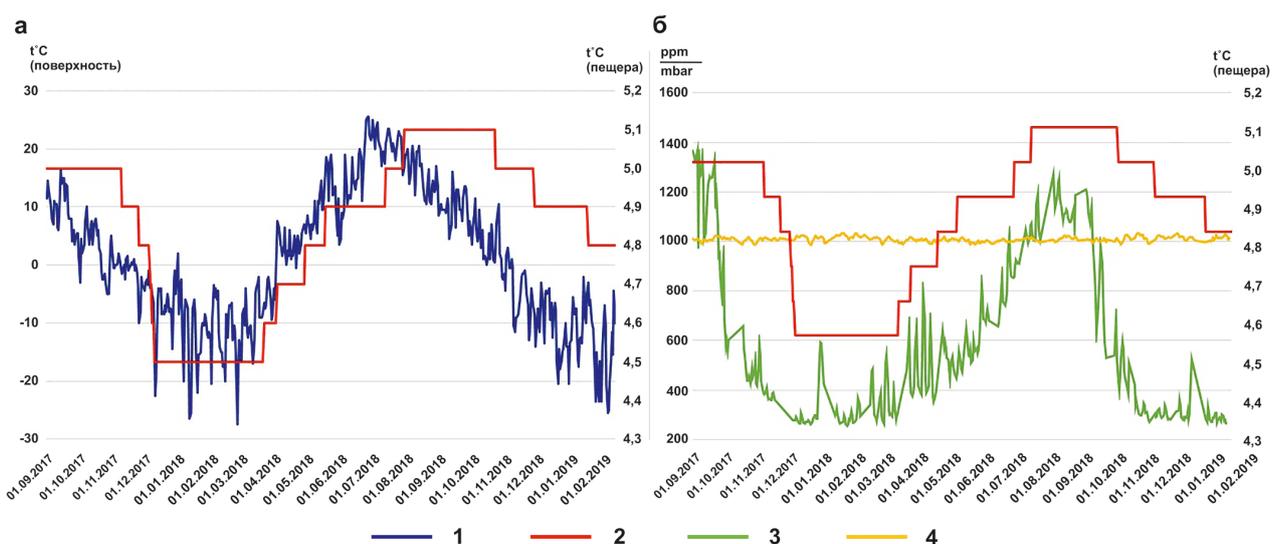


Рис. 1. Изменение концентрации углекислого газа (ppm) в гроте Дружбы Народов с сентября 2017 г. по февраль 2019 г.: а — ход температуры в гроте и на поверхности; б — изменение температуры, давления в гроте и концентрации углекислого газа: 1 — температура на поверхности; 2 — температура в гроте; 3 — концентрация углекислого газа; 4 — давление в гроте

Fig. 1. The change in carbon dioxide concentration (ppm) in the Druzhby Narodov grotto from September 2017 to February 2019: a — the temperature course in the grotto and on the surface; b — change in temperature, pressure in the grotto and the concentration of carbon dioxide: 1 — surface temperature; 2 — temperature in the grotto; 3 — carbon dioxide concentration; 4 — pressure in the grotto

ное увеличение уровня CO_2 , тогда как с падением этих значений — уменьшение.

Результаты анализа концентраций углекислого газа в зимний и летний периоды в разных микроклиматических зонах (рис. 3, 4) позволили сделать выводы, что в зимнее время от зоны отрицательных температур

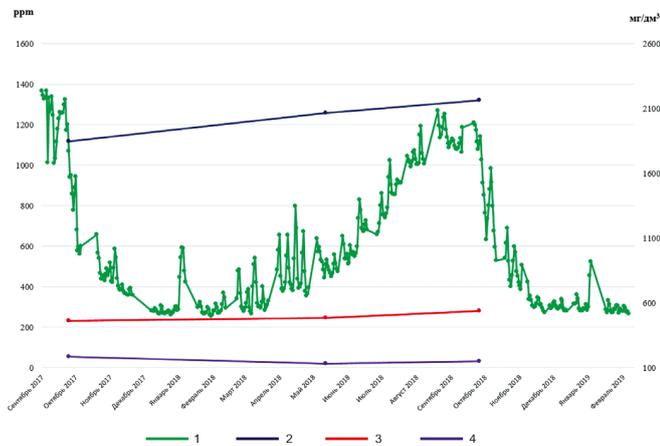


Рис. 2. Изменение концентрации углекислого газа (ppm) в гроте Дружбы Народов в период с 2017 по 2018 гг.: 1 — уровень CO_2 в гроте; 2 — общая минерализация, мг/дм³; 3 — концентрация Ca^{2+} , мг/дм³, 4 — концентрация HCO_3^- , мг/дм³

Fig. 2. The change in carbon dioxide concentration (ppm) in the Druzhby Narodov grotto in the period from 2017 to 2018: 1 — the level of CO_2 in the grotto; 2 — total mineralization, mg/dm³; 3 — concentration of Ca^{2+} , mg/dm³, 4 — concentration of HCO_3^- , mg/dm³

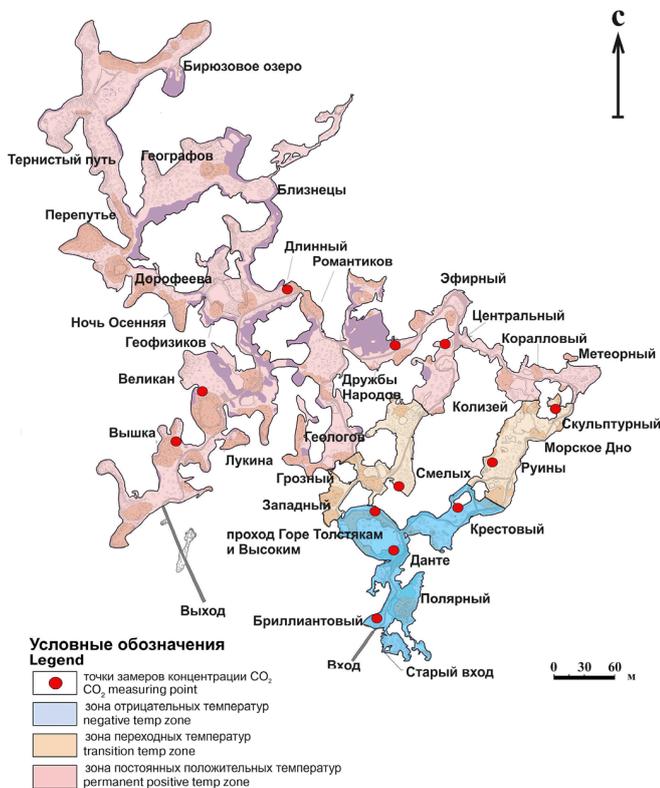


Рис. 3. Точки замеров концентраций углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере

Fig. 3. Measurement points for carbon dioxide concentrations in the Kungur Ice Cave

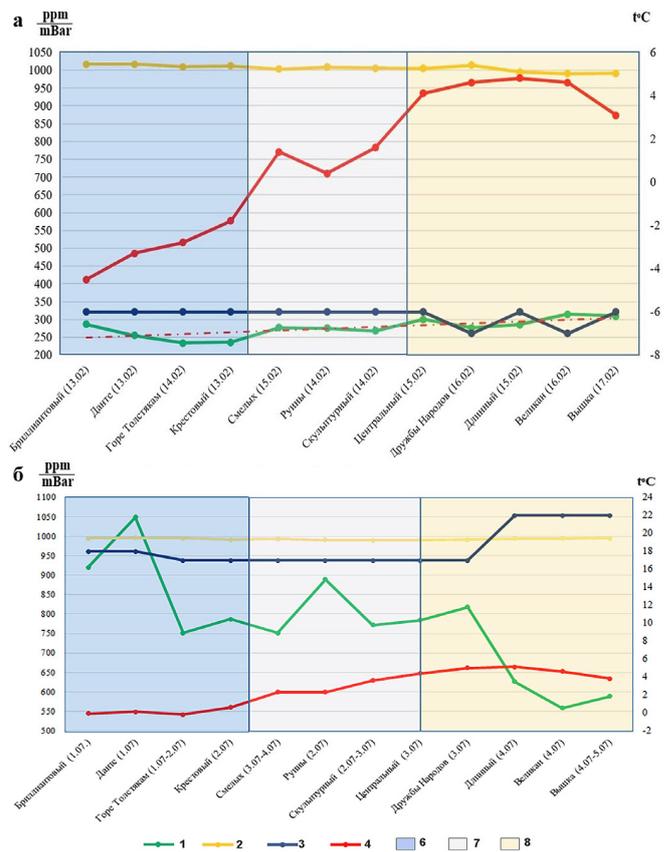


Рис. 4. Изменение концентрации углекислого газа в разных температурных зонах в зимний (а) и летний (б) периоды: 1 — концентрация CO_2 в гроте; 2 — давление в гроте; 3 — температура замера на поверхности; 4 — температура в гроте; 5 — линия тренда содержания CO_2 ; 6 — зона отрицательных температур; 7 — зона переходных температур; 8 — зона постоянных положительных температур

Fig. 4. Change of carbon dioxide concentration in different temperature zones in winter (a) and summer (b) seasons: 1 — CO_2 concentration in the grotto; 2 — pressure in the grotto; 3 — temperature measurement on the surface; 4 — temperature in the grotto; 5 — trend line of CO_2 content; 6 — zone of negative temperatures; 7 — transitional temperature zone; 8 — zone of constant positive temperatures

к зоне постоянных положительных температур происходит увеличение содержания CO_2 (от 234 до 309 ppm), в летнее время — уменьшение (от 1049 до 558 ppm). Различные значения углекислоты в подземной атмосфере гротов указывают на ее неравномерное распределение по всему объему карстовой полости.

В зоне отрицательных температур в холодный период при движении от входа (грот Бриллиантовый) в глубь пещеры (грот Крестовый) по мере увеличения температуры снижается концентрация углекислоты с 286 до 235 ppm (рис. 4, а). Минимальное значение CO_2 в этой зоне зафиксировано в проходе Горе Толстякам и Высоким (234 ppm), максимальное — в гроте Бриллиантовом (286 ppm). В теплый период от грота Бриллиантового к гроту Крестовому и проходу Горе Толстякам и Высоким количество CO_2 изменяется от 920 до 787 ppm (рис. 4, б). Минимальная концентрация CO_2 также зафиксирована в проходе Горе Толстякам и Высоким (751 ppm), максимальная — в гроте Данте (1049 ppm).



В зоне переходных температур зимой и летом наблюдается незначительное снижение CO_2 от грота Руины (275 ppm/890 ppm) до грота Скульптурного (268 ppm/772 ppm) при повышении температуры на 1.2–1.3 °C и далее увеличивается при движении к Центральному гроту (300 ppm/784 ppm). Концентрация углекислого газа повышается от грота Смелых к гроту Центральному как в зимний, так и в летний период.

В зоне положительных температур в зимний период при движении от грота Центрального (300 ppm) к выходу из пещеры (грот Вышка — 309 ppm) отмечены низкие значения CO_2 в гротах Дружбы Народов (276 ppm) и в гроте Длинном (285 ppm). В летний период максимальная концентрация углекислого газа зафиксирована в гроте Дружбы Народов (818 ppm), минимальная — в гроте Великан (558 ppm).

Такие вариации в разное время года связаны не только с температурным режимом, но и с интенсивностью воздухообмена между пещерой и поверхностью и циркуляцией воздушных масс в пещере. В зимний и летний периоды отличается направленность движения воздушного потока в разных гротах пещеры, следовательно, меняется и концентрация углекислого газа на этом участке.

В зимнее время потоки теплого воздуха поднимаются по вертикальным каналам из гротов на поверхность земли, а холодный и более плотный атмосферный воздух подсасывается в них по системам горизонтальных галерей и поступает внутрь пещеры через входной тоннель. Более мощная струя воздуха отмечается на входе в пещеру. Она формируется посредством трех основных притоков с поверхности: из входного тоннеля, Старого лаза и Телячьего хода. Этот поток движется через грот Данте до развилки на Малое и Большое кольцо, где разделяется на два потока: одна его часть продолжает движение в направлении грота Крестового до гротов Центрального — Эфирного, другая (примерно 60–70 % воздуха) — в направлении грота Западного через проход горе Толстякам и Высоким до гротов Центрального — Дружба Народов и Хлебниковых — Длинного. Со стороны грота Вышка воздушный поток устремляется в глубь пещеры до грота Длинного и Заповедной части пещеры [5]. В самом гроте 20 % воздуха просачивается через закрытые шлюзовые двери выходного тоннеля, а 80 % составляют приточки из трещин массива.

Летом воздух просачивается в пещеру с поверхности Ледяной горы и разгружается через трещины массива у его подножия, а также через входной и выходной тоннели и Старый вход. От грота Дружбы Народов воздух начинает свое движение в двух противоположных направлениях: в сторону грота Хлебниковых в направлении выходной штольни и в сторону грота Эфирного в направлении грота Центрального. В гроте Центральном поток делится, одна его часть направляется в грот Колизей, другая — в сторону грота Кораллового. Поток, движущийся к выходному тоннелю, также раздваивается: в сторону грота Геологов и в грот Длинный. Струя воздуха, проходящая через грот Геологов, соединяется с потоком, движущимся из грота Смелых, и продолжает движение в направлении грота Западного. После прохода Горе Толстякам эта струя соединяется с потоком, идущим в направлении входного тоннеля из грота Крестового [5].

Данные, полученные при проведении воздушно-депресссионной съемки, а также работы по картированию зон трещиноватости в 2018–2019 гг. позволили выявить и проанализировать зависимость уровня CO_2 от трещиноватости пород, используя коэффициенты трещиноватости и расход воздушного потока. Значения площадного коэффициента варьируют от 0.26 $\text{м}^2/\text{м}^2$ (грот Скульптурный) до 2.12 $\text{м}^2/\text{м}^2$ (проход Горе Толстякам и Высоким). Объемный коэффициент изменяется от 0.005 шт/ м^3 (грот Вышка) до 0.608 шт/ м^3 (проход Горе Толстякам и Высоким). По графику видно, что изменение коэффициентов по отношению к концентрации CO_2 практически идентично. С уменьшением значений площадного и объемного коэффициентов трещиноватости в гротах уровень углекислоты возрастает. Наибольшие значения коэффициентов трещиноватости в основном характерны для гротов, расположенных в присклоновой части массива.

Аналогичная ситуация прослеживается и с расходом воздушного потока (рис. 5). Расход воздуха минимален в гроте Смелых и составляет 25 $\text{м}^3/\text{мин}$, что связано с разделением воздушных масс на два потока по-



Рис. 5. Изменение концентрации углекислого газа от трещиноватости массива и скорости воздушного потока: 1 — концентрация CO_2 в гроте; 2 — скорость воздушного потока ($\text{м}^3/\text{с}$); 3 — площадной коэффициент интенсивности трещиноватости ($\text{м}^2/\text{м}^2$); 4 — объемный коэффициент трещиноватости (шт/ м^3)

Fig. 5. Changes in carbon dioxide concentration due to massif fracture and airflow rate: 1 — CO_2 concentration in the grotto; 2 — air velocity (m^3/s); 3 — areal coefficient of fracture intensity (m^2/m^2); 4 — fracture volume coefficient (pcs/m^3)



сле грота Грозного. Максимальные значения расхода воздуха зафиксированы в гроте Данте — 443 м³/мин — за счет объединения потоков с входного тоннеля и старого входа и увеличения площади сечения, через который проходит масса воздуха. Поскольку замеры проводились в течение короткого периода времени, недостаточно количества данных для установления корреляционной зависимости между коэффициентами трещиноватости, расходом воздуха и концентрацией CO₂.

Выводы

Выявлены и проанализированы факторы, влияющие на концентрацию углекислоты в пещере, охарактеризована взаимосвязь изменения содержания углекислого газа от минерализации подземных вод.

Основной причиной распределения и динамики концентраций CO₂ в атмосфере пещеры является температурный режим (поверхностный и подземный), что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции ($r = 0.63-0.72$) в гроте Дружбы Народов. Хорошо прослеживается сезонность изменения углекислоты. В зимний период времени концентрация углекислого газа минимальна (300 ppm), что связано с восходящей циркуляцией воздуха. В летний период, когда воздухообмен в пещере минимален, фиксируются максимальные концентрации CO₂ (>1000 ppm). Зависимость углекислого газа, содержащегося в гроте Дружбы Народов, от минерализации воды очень слабая ($r = 0.21$) и статистически незначимая. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.05$ говорит о том, что только 0.05 % изменения концентрации CO₂ контролируется изменением минерализации. Между изменением давления в гроте и количеством CO₂ взаимосвязи не установлено ($r = -0.2$).

Анализ изменений концентраций углекислого газа в зимний и летний периоды в 12 гротах показал, что вариации содержания CO₂ зависят от микроклиматических параметров (температура в пещере), регуляции скорости движения, направления воздушных потоков и трещиноватости массива. В зимний период при движении воздушных потоков в глубь пещеры от зоны отрицательных температур к зоне постоянных положительных температур происходит увеличение содержания CO₂ (от 234 до 314 ppm). В летнее время при смене режимов проветривания и направления воздушных масс происходит снижение концентрации углекислоты (от 1049 до 558 ppm) от зоны отрицательных температур к зоне постоянных положительных температур. С увеличением трещиноватости происходит уменьшение концентрации CO₂ в гротах в результате восходящей зимней циркуляции воздуха и выноса теплого воздуха на поверхность через трещины массива.

Основным фактором изменения концентрации углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере являются поверхностный и подземный температурный режимы. Второстепенными факторами выступают трещиноватость массива, распределение в течение года воздушного потока, который связан с изменением температуры на поверхности, и минерализация вод подземных озер.

Таким образом, комплекс полученных результатов позволяет сделать вывод, что в Кунгурской ледяной пещере концентрация углекислого газа (от 200 до 1500 ppm) не превышает допустимых значений (5000 ppm). Такие содержания углекислоты в подземной атмосфере пещеры являются наиболее безопасными для ведения экскурсионной деятельности, в отличие, например, от пещеры Золушка, где концентрация CO₂ достигает 50000 ppm. В условиях интенсивной эксплуатации в Кунгурской ледяной пещере необходим постоянный контроль за динамикой содержания углекислого газа. Мониторинговые исследования будут продолжены.

Литература

1. Андрейчук В., Телешман И., Куприч П. Пространственно-динамические особенности распределения CO₂ в воздухе пещеры Золушка // Спелеология и карстология. 2011. № 7. С. 15–25.
2. Исследования газового состава воздуха в Кунгурской ледяной пещере и разработка регламента проветривания: отчет по договору № 98/08 от 10 апреля 2008 г. / Горный институт УрО РАН; рук. Казаков Б. П., исполн. Круглов Ю. В., Кадебская О. И. М., 2009. 93 с.
3. Кадебская О. И., Южанин А. С. Исследования газового состава воздуха в Кунгурской ледяной пещере // Горное эхо: Вестник Горн. ин-та УрО РАН. 2009. № 4. С. 28–34.
4. Казанцева А. С., Красиков А. В. Сезонные вариации газового состава воздуха в Кунгурской Ледяной пещере // Горное эхо: Вестник Горного ин-та УрО РАН. 2017. № 2 (67). С. 33–37.
5. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под ред. В. Н. Дублянского. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 375 с.
6. Максимович Г. А., Панарина Г. Н. Химический состав вод подземных карстовых озер Пермской области // Пещеры. 1966. Вып. 7 (8). С. 47–53.
7. Трофимов А. А. Углекислый газ пещеры Шульган-Таш (каповой) // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5. С. 108.
8. Эмба Я. А., Дбар Р. С. Антропогенное воздействие на экосистемы карстовых пещер Абхазии при рекреационном освоении // Устойчивое развитие горных территорий. 2010. № 3 (5). С. 75–84.
9. Evans, J. D., 1996. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences, Pacific Grove. Brooks/Cole Publishing, CA
10. Luetscher M., Ziegler F. 2012. CORA-a dedicated device for carbon dioxide monitoring in cave environments. International Journal of Speleology, 41(2), p. 273–281.

References

1. Andreichuk V. Teleshman I. Kuprich P. 2011. *Prostranstvenno-dinamicheskie osobennosti raspredeleniya CO₂ v vozduhe pescheri Zolushka* (Spatial-dynamic features of CO₂ distribution in the air of the cave Zolushka). *Speleologiya i karstologiya* (Speleology and cartography), No. 7, Simferopol, pp. 15–25.
2. *Issledovaniya gazovogo sostava vozduha v Kungurskoi Ledyanoi peschere i razrabotka reglamenta provetrivaniya* (Studies of the gas composition of air in the Kungur Ice Cave and the development of ventilation regulation). Report by agreement No. 98/08 10 April 2008. Mining Institute UB RAS, 93 p.



3. Kadebskaya O. I., Yuzhanin A. S. *Issledovaniya gazovogo sostava vozduha v Kungurskoj Ledyanoj peshchere* (Studies of the gas composition of the air in the Kungur Ice cave). *Gornoe ekho: Vestn. Gorn. in-ta*, 2017, No. 4, pp. 28–34.

4. Kazantseva A. S., Krasikov A. V. *Sezonnye variacii gazovogo sostava vozduha v Kungurskoj Ledyanoj peshchere* (Seasonal variations of the gas composition of the air in the Kungur Ice Cave). *Gornoe ekho: Vest. Gornogo in-ta*, 2017, Perm, No.2 (67), pp. 33–37.

5. *Kungurskaya Ledyanaya peschera opit rejimnih nablyudenii* (Kungur Ice Cave — observations). Ed. V. N. Dublyansky, 2005, Ekaterinburg: UB RAS, 375 p.

6. Maksimovich G. A., Panarina G. N. *Himicheskij sostav vod podzemnyh karstovyh ozer Permskoj oblasti* (The chemical composition of the waters of the underground karst lakes of the Perm region), *Peshchery*, 1966, 7 (8), Perm, pp. 47–53.

7. Trofimov A. A. *Uglekislii gaz peschery Shulgan-Tash (Kapovoi)* (Carbon dioxide of Shulgan-Tash cave (Kapova)). *Sovremennye naukoemkie tehnologii* (Modern high technologies), 2014, No.5, 108 p.

8. Ekba Ya. A., Dbar R. S. *Antropogennoe vozdeistvii na ekosistemi karstovih pescher Abhazii pri rekreacionnom osvoenii* (Anthropogenic impact on the ecosystems of the karst caves of Abkhazia during recreational development). *Ustoichivoe razvitiie gornii territorii* (Sustainable development of mining regions), 2010, No.3 (5), pp. 75–84.

9. Evans, J. D., *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*, Pacific Grove. Brooks/Cole Publishing, CA, 1996.

10. Luetscher M., Ziegler F. CORA-a dedicated device for carbon dioxide monitoring in cave environments. *International Journal of Speleology*, 2012, 41(2), pp. 273–281.