

УДК 551.44

АНТРОПОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ НА МИКРОКЛИМАТ И ОЛЕДЕНЕНИЕ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ В ПЕРИОД МАКСИМАЛЬНОЙ ТУРИСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

© 2023 г. А. С. Казанцева^{1,2,*}, А. В. Красиков¹

¹Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*e-mail: kazanalena@bk.ru

Поступила в редакцию 25.01.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

По данным проведённых в летнее время исследований в Кунгурской Ледяной пещере, во время максимальной туристической нагрузки, сделаны выводы об антропогенном влиянии на микроклимат и оледенение пещеры. Рассмотрены основные виды воздействия человека на подземную среду, особое внимание уделено тепловому воздействию на изменение температурного режима и масштаба оледенения в существующих условиях эксплуатации Кунгурской Ледяной пещеры.

Ключевые слова: Кунгурская Ледяная пещера, микроклимат, оледенение, антропогенное воздействие, тепловое загрязнение

DOI: 10.31857/S2076673423040087, EDN: HBXDPP

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных природных памятников Пермского края особое место занимает Кунгурская Ледяная пещера. Это одна из самых известных, популярных и интересных туристических достопримечательностей, которая на протяжении уже более 100 лет принимает гостей со всего мира.

Пещера расположена в Предуралье, на правом берегу р. Сылвы на окраине города Кунгур (село Филипповка). Она образована в пределах широтно вытянутого выступа гипсоангидритовых отложений ледянопещерской пачки (южный склон Ледяной горы) и представляет собой разветвлённую систему карстовых пустот, состоящих из гротов и соединяющих их проходов, протянувшихся от борта долины р. Сылвы (на уровне её первой надпойменной террасы) вглубь Ледяной горы на 650 м. По последним данным, протяжённость её ходов составляет 8.15 км (Красиков, 2022). В настоящее время Кунгурская Ледяная пещера — одна из самых протяжённых гипсовых пещер России и самая крупная среди них по объёму.

Такой уникальный объект природы как Кунгурская Ледяная пещера нуждается в комплексных мониторинговых наблюдениях. Подобные мероприятия позволяют поддерживать и сохранять естественное состояние массива, контролировать процессы, происходящие в условиях ан-

тропогенной нагрузки, а также обеспечивать безопасность посещения пещеры. С этой целью в 1948 г. при пещере создан научный стационар (ныне Кунгурская лаборатория-стационар ГИ УрО РАН), сотрудники которого и по настоящее время исследуют микроклиматические, гляциологические, гидрогеологические, гидрохимические и геологические особенности Кунгурской Ледяной пещеры, а также проводят маркшейдерский контроль и горнотехнические наблюдения.

Ледяное убранство — это то, что делает пещеру особенной, привлекает туристов и исследователей. Лёд в Кунгурской Ледяной пещере накапливается в привходовой части, где с поверхности через вертикальные расщелины и каналы проникают атмосферные и талые воды, а также за счёт конденсационной влаги. В 1969 г. Е.П. Дорофеев дал наиболее полное описание и выделил несколько типов льда: конжеляционные, сегрегационные, сублимационные и осадочно-метаморфические льды (Кадебская, Дублянский, 2004). Конжеляционные льды (имеют преобладающее развитие — 98%) образуются при замерзании воды и включают в себя натёчные образования (сталагмиты, сталактиты, сталагматы, покровы и каскады), льды водоёмов, жильные льды; сегрегационные льды образуются из воды, которые содержатся в породе в период промерзания; сублимационные льды появляются в местах контакта холодного сухого и тёплого влажного воздуха

или тёплого воздуха и холодного основания на сводовой части или стенах гротов и галерей, они представлены различными видами кристаллов (листовидные, лотковые, пирамидальные, прямоугольные, игольчатые, а также более сложными формами — сростками); осадочно-метаморфические льды образуются при падении кристаллов со свода на пол пещеры, превращаясь впоследствии в зернистый фирн и лёд, образуют покров.

На формирование ледяных кристаллов влияют температура воздуха, степень его пересыщения влагой и скорость поступления этой влаги. Но простого охлаждения воздуха недостаточно, необходимо формирование особых условий вентиляции, которые влияют на интенсивность отвода тепла от места образования различных видов льда. Оледенение пещеры с момента её благоустройства в 1937 г., когда был сооружён входной тоннель, стало зависеть от искусственного проветривания, а для того чтобы сохранить пещеру и количество льда в неизменном виде, необходимо более качественно контролировать температурный режим и динамику оледенения во всех гротах. Важнейшим вопросом управления экологическим состоянием Кунгурской Ледяной пещеры является регулирование её микроклимата, а именно — температурного баланса в полости (Кадебская, 2002; Казанцева, Кадебская, 2017).

Микроклиматический режим Кунгурской пещеры определяется общими закономерностями формирования микроклимата карстовых полостей, расположенных на междуречных пространствах (Лукин, 1962). Первые измерения температуры воздуха на поверхности и в пещере произвёл в 1733 г. профессор Петербургской Академии наук И.Г. Гмелин (Дублянский, 2005). В 1934 г. карстовая группа Ленгидростройпроекта оборудовала в пещере метеорологические посты, на которых начались наблюдения. Но регулярные измерения начаты с 1951 г. В настоящее время измерения температуры воздуха проводятся в 31 гроте пещеры.

Для Кунгурской Ледяной пещеры (рис. 1) характерны три микроклиматические зоны: зона постоянных отрицательных температур (в течение года температура $t \leq -1^{\circ}\text{C}$), переходная зона (от -1 до $+2^{\circ}\text{C}$) и зона постоянных положительных температур ($t \geq +2^{\circ}\text{C}$) и две зоны оледенения: зона постоянного (среднегодовая температура отрицательная) и сезонного (смена знаков температуры в течение сезонов) оледенения. Температура воздуха в Кунгурской Ледяной пещере колеблется в значительных пределах (летом может варьировать от -4 и до $+5.5^{\circ}\text{C}$), зимой от -20 и до $+5.5^{\circ}\text{C}$), в привходовой части колебания выражены наиболее отчётливо.

Микроклимат Кунгурской Ледяной пещеры определяется движением воздуха и во многом зависит от сезона. Наблюдения за воздушным режимом основаны на выполнении воздушной съёмки, которая включает замеры скоростей и направлений воздушных потоков в определённых точках пещеры, что позволяет рассчитать расход и определить направления потоков воздуха. Детальное изучение воздушных потоков, распределения температур и влажности воздуха позволяет предпринимать меры для пополнения запаса холода в зоне постоянных отрицательных температур. Закономерности проветривания пещеры рассматриваются исходя из температурных периодов окружающей среды, которые можно условно разделить на следующие: холодный период (температура окружающей среды $< 0^{\circ}\text{C}$), тёплый период (температура $> +5^{\circ}\text{C}$), промежуточные осенний и весенний (температура наружного воздуха колеблется в пределах от 0 до $+5^{\circ}\text{C}$). На основе существующего регламента проветривания сотрудники регулируют естественный воздушный поток в пещере: в тёплое время (при температуре выше $+5^{\circ}\text{C}$) в пещере используется режим проветривания, при котором во входном и выходном тоннелях шлюзовые двери закрыты, в холодное (при температуре ниже 0°C) — двери входного шлюза открыты, а двери выходной шлюзовой части закрыты (Красиков, Казанцева, 2019). В зимний период потоки тёплого 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 и Старый вход. В первых гротах скорости воздушных потоков достигают 0.9 м/с. В летнее время направление воздушного потока изменяется на противоположное: более холодный воздух вытекает из каналов в бортах массива Ледяной горы, а с её поверхности подсасывается более тёплый воздух. Движение воздуха в пещере в это время минимальное.

Комплексные исследования температурного режима проводились в некоторых пещерах, но такие исследования немногочисленны. Так, в Новоафонской пещере в Абхазии (Цикаришвили, 1978; Мавлюдов и др., 2018) средние величины температуры воздуха изменяются от $+12.8^{\circ}\text{C}$ в конце зимы до $+16.6^{\circ}\text{C}$ в конце лета (амплитуда колебаний составляет 3.8°C). В настоящее время максимальная температура внутри пещеры Тачекиной (Староладожской, Ленинградская область, деревня Старая Ладога; Шеховский, Кустикова, 2020) $+10.3^{\circ}\text{C}$ зафиксирована на возвышенностях, а минимальная $+1.1^{\circ}\text{C}$ — недалеко от второго входа и $+6^{\circ}\text{C}$ над водой у западного края озера. В пещере Киндерлинской им. 30-летия победы на Урале (Лобанов, 1981) в привходовой части близ наледи температура даже летом

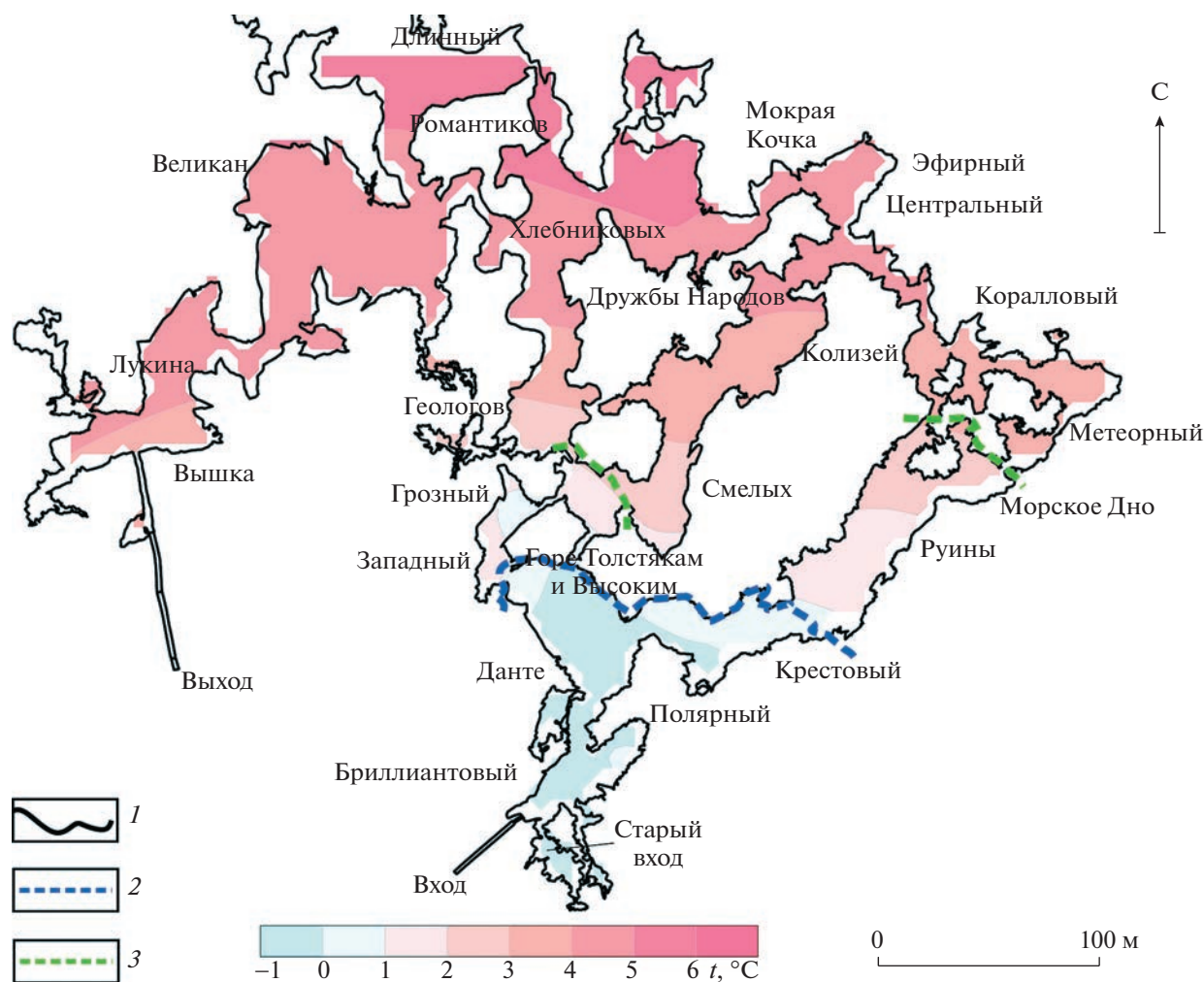


Рис. 1. План Кунгурской Ледяной пещеры с изолиниями температуры воздуха в летний период 2022 г.: 1 – контур пещеры; 2 – зона постоянного оледенения; 3 – зона сезонного оледенения.

Fig. 1. Plan of the Kungur Ice Cave with air temperature contours in summer 2022: 1 – the contour of the cave; 2 – zone of permanent glaciation; 3 – zone of seasonal glaciation.

держится -12°C , а за наледью поднимается до $+4...+8^{\circ}\text{C}$ и постоянна в течение года. В пещере Шульган-Таш на Урале (Ляхницкий, Чуйко, 1999; Ляхницкий и др., 2010) во внутренних залах температура практически постоянна в течение всего года и составляет от $+5$ до -6°C .

Микроклимат пещеры определяется воздействием внешних факторов – климатическими и погодными условиями на поверхности, вследствие чего происходит распределение воздушных потоков и температур по контуру пещеры. Температура – один из самых важных параметров системы мониторинга, позволяющих отслеживать и контролировать температурные условия в зоне отрицательной микроклиматической температурной аномалии, зоне переходных и положительных температур. Многолетний тренд изменения температуры показывает, что в периоды повышения температуры воздуха (весенне-летний

период) на поверхности происходит повышение температуры в гротах зон отрицательных и переходных температур.

Регулирование естественного воздушного потока в пещере проводится на основе существующего регламента проветривания, разработанного в 2008 г., при котором в тёплый и холодный периоды используются разные режимы проветривания (на основе закрытия/открытия дверей). Устойчивость оледенения пещеры выражается в динамическом равновесии поступления и расхода тепла в пещере. Установившееся динамическое равновесное состояние оледенения может быть нарушено при изменениях внешнего климата, притока воды в пещеры, строения полостей. Изменение внешней температуры воздуха отражается на оледенении через изменение в пещере запаса холода: потепление в весенне-летний период приводит к уменьшению зоны сезонного

оледенения, похолодание в осенне-зимний период — к её увеличению. Направленное изменение температуры воздуха в течение длительного периода времени способствует переходу температурных условий в пещере на новую ступень, что ведёт к смещению границ сезонного оледенения в полости. При похолоданиях запас холода в пещере увеличивается и границы сезонного оледенения смещаются в глубину полости; при потеплениях запас холода уменьшается и границы перемещаются к выходу (Кадебская, 2008). Ежегодно рассчитывается годовой, летний и зимний баланс массы льда, который определяется как соотношение увеличения и уменьшения мощности ледяных отложений в пещере. В настоящее время в Кунгурской Ледяной пещере наибольшая потеря льда зафиксирована в зимний период, летом же потери минимальны.

Отработанная годами система мониторинга позволяет создать оптимальную среду в гротах Кунгурской Ледяной пещеры, которая способствует поддержанию пещеры в устойчивом состоянии, сохранению снежно-ледяных образований (натёчных образований и различных видов кристаллов), росту и увеличению продолжительности их существования, сохранению границ постоянного многолетнего оледенения. Зона постоянного оледенения сохраняется в радиусе 200 м, начинается во входной части пещеры (грот Бриллиантовый и Старый вход) и заканчивается в гроте Крестовый и проходе Горе Толстякам и Высоким (см. рис. 1).

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для Кунгурской Ледяной пещеры можно выделить два типа воздействия: природное (естественное) и антропогенное, которые приводят к преобразованию её качественных характеристик. Природное воздействие на пещеру обусловлено влиянием внешнего климата и его наиболее важных характеристик, таких как температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра. Антропогенное воздействие связано с эксплуатацией пещеры. Кунгурская Ледяная пещера с давних пор посещалась и использовалась человеком. Люди не только осматривали пещеру, но и старались преобразовать, приспособить её для безопасного и удобного посещения. С развитием экскурсионного дела (с конца позапрошлого века, когда жители села Банное, ныне Филипповка, начали водить в пещеру приезжих) пещера стала объектом всё более возрастающего влияния со стороны человека, поскольку рост посещаемости выдвигал всё новые требования к её доступности (благоустройству) (Андрейчук, Дорофеев, 1995).

Можно выделить несколько уровней антропогенного воздействия на Кунгурскую Ледяную пещеру. В одном случае человек выступает как пре-

образователь, то есть вносит технические и инженерные изменения в процессе эксплуатации пещеры — обустройство входного и выходного тоннелей, расчистка проходов от глины и обломков, снятие кровли низких ходов с помощью бурения шпуров и взрывов, сооружение защитных стенок и многочисленных крепей, установка системы освещения. Это такие работы, которые непосредственно влияют на изменение микроклиматических параметров пещеры и её морфометрию, а также приводят к развитию своеобразной биоты (например, ламповой флоры). Сюда же входит и регулирование проветривания пещеры через открытие дверей и устья вентиляционной скважины, что очень сильно влияет на состояние оледенения в пещере.

Второй уровень воздействия, когда человек выступает как физический, химический и биологический источник изменений физического и экологического режима, что приводит к загрязнению отдельных компонентов подземной среды (воды, воздуха, горных пород и отложений пещеры, включая лёд). К такому типу воздействия можно отнести привнос органического и неорганического материала (мусора), чуждых бактерий или других организмов, выделение углекислого газа (CO_2), а также тепловое воздействие. Если первые два типа загрязнения очевидны, то стоит рассмотреть подробно последние два.

Выделение углекислого газа посетителями или работниками — один из видов химического загрязнения пещеры. В рамках мониторинговых исследований в Кунгурской Ледяной пещере были проведены сезонные наблюдения за изменением уровня CO_2 в некоторых гротах, а также оценено влияние экскурсантов на газовый состав воздуха (Казанцева, Красиков, 2017). Сезонные измерения CO_2 показали, что прежде всего концентрация газа зависит от изменения температуры воздуха в гротах и на поверхности: в зимнее время концентрация низкая (220–290 ppm), что связано с зимним проветриванием, а в летнее — повышенная (1050–1490 ppm), поскольку летом проветривания нет. Прослежена зависимость между численностью посетителей и концентрацией углекислого газа в гротах Кунгурской Ледяной пещеры: пики максимального содержания CO_2 в воздухе пещеры возникают после посещения наибольшего количества людей. При этом содержание углекислого газа не превышает предельно допустимые концентрации (5000 ppm), ни в летний, ни в зимний периоды.

Оборудование пещеры для экскурсионного посещения предполагает нахождение в ней большого количества экскурсантов. Люди выделяют тепло, количество которого зависит как от природных факторов (температура и влажность воздуха), так и от некоторых индивидуальных осо-

бенностей человека (его размеры, скорость движения, частота дыхания, одежда и т.д.), и варьирует в широких пределах. Влияет ли выделяемое тепло на изменение микроклиматических параметров пещеры? В.С. Лукин в 1950-х годах предложил методику расчёта влияния посещаемости и осветительных приборов на изменение теплового баланса в пещере (Лукин, 1962). О.И. Кадебская скорректировала данные с учётом выделения тепла экскурсантов и осветительных приборов (Кадебская, 2004). В 2000-х годах был выполнен расчёт общего количества тепла, выносимого из пещеры (холодный период), и притока тепла в пещеру (тёплый период) с учётом разных показателей (количество тепла, идущее на нагревание атмосферного воздуха, поступающего в пещеру; охлаждение, вызванное уменьшением плотности восходящих потоков воздуха; количество теплоты, поглощающейся в процессе испарения воды и льда; приток тепла в пещеру от работы электроосветительного оборудования; приток тепла от прохождения экскурсантов в пещере; компенсация теплопритока из глубины земли в части пещеры, ограниченной нулевой изотермой) (Кадебская, 2004). Средняя продолжительность периода, в который происходит вынос тепла из пещеры, когда температура внешнего воздуха ниже 5°C , составляет 203 суток. В это время приток тепла от прохождения экскурсантов в пещере составляет 26.2 МДж. В тёплый период начинается приток тепла в пещеру, когда средняя температура внешнего воздуха поднимается выше 5°C , средняя продолжительность периода равна 162 суткам. Средний приток тепла от прохождения экскурсантов за этот период в пещере равен 31.0 МДж. Преимущественно в тёплый период посещаемость сказывается на тепловом состоянии пещеры. Но прямых оснований и исследований, доказывающих, что количество экскурсантов влияет на масштабы оледенения в пещере, нет, как нет и данных об изменении температуры в гротах пещеры при посещении туристов. В данной статье сделана попытка оценить влияние туристов и выделяемого ими тепла на микроклиматические характеристики, в частности температуру, в гротах Кунгурской Ледяной пещеры. А поскольку сохранение и образование снежно-ледяных образований зависит от микроклимата пещеры, то оценено влияние туристического потока на изменение оледенения в пещере.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения выбраны два грота (Бриллиантовый и Данте) в зоне отрицательных температур (среднегодовая температура воздуха ниже -1°C), находящиеся в привходовой части пещеры на расстоянии 40 и 106 м соответственно, от входа в пещеру, где снежно-ледяные образования сохра-

няются круглый год (см. рис. 1). Для оценки влияния посетителей на микроклимат пещеры непрерывно в течение двух недель (с 24 июня по 8 июля 2022 г.) во время проведения на территории города Кунгур фестиваля воздухоплавания “Небесная ярмарка” (25 июня — 2 июля) записывали значения температуры каждую минуту. В этот период обычно наблюдается большой поток туристов в пещеру, следовательно, это наиболее показательный период для изменения микроклиматических параметров.

Для непрерывной записи температуры воздуха в пещере использовали датчики температуры НОВО Water Temp Pro v220. В гроте Бриллиантовый датчик установлен непосредственно над экскурсионной площадкой в 8 м от входа в грот, на высоте 2.5 м. В гроте Данте логгер также установлен над экскурсионной тропой в 8.5 м от входа в грот на высоте 2 м. На основе данных наблюдений метеостанции “MeteoscanPro 923”, установленной на территории Кунгурской лаборатории-стационара ГИ УрО РАН, оценивали синоптические условия (температура на поверхности). Дополнительно у ООО “Сталагмит”, который на основе лицензии предоставляет экскурсионные туристические услуги, запросили данные о количестве посетителей и времени заходов групп в период измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Большую роль в формировании воздушных потоков и температурного режима пещеры играют входной и выходной тоннели, а также вертикальные полости, через которые происходит воздухообмен между пещерой и атмосферой. На основе температурных показателей, полученных за двухнедельный период наблюдений, построены графики соотношения температуры на поверхности и в гротах пещеры, которые расположены в привходовой части (рис. 2).

В привходовой части пещеры микроклимат изменчив и характеризуется резкими колебаниями температуры: при повышении температуры на поверхности температура в гротах пещеры тоже увеличивается, при понижении, соответственно, наоборот. Средняя температура на поверхности в период с 24 июня по 8 июля 2022 г. составляла $+14.4^{\circ}\text{C}$, в гроте Бриллиантовый — -0.6°C , в гроте Данте — -0.2°C . Разница температур на поверхности и в пещере уменьшается при движении внутрь карстового массива. Хорошо выражены и суточные колебания температуры в пещере: в ночное время отмечена тенденция к понижению температуры.

В летний период в пещере соблюдается такой режим, при котором все шлюзовые двери входного и выходного тоннелей закрыты и привнос теп-

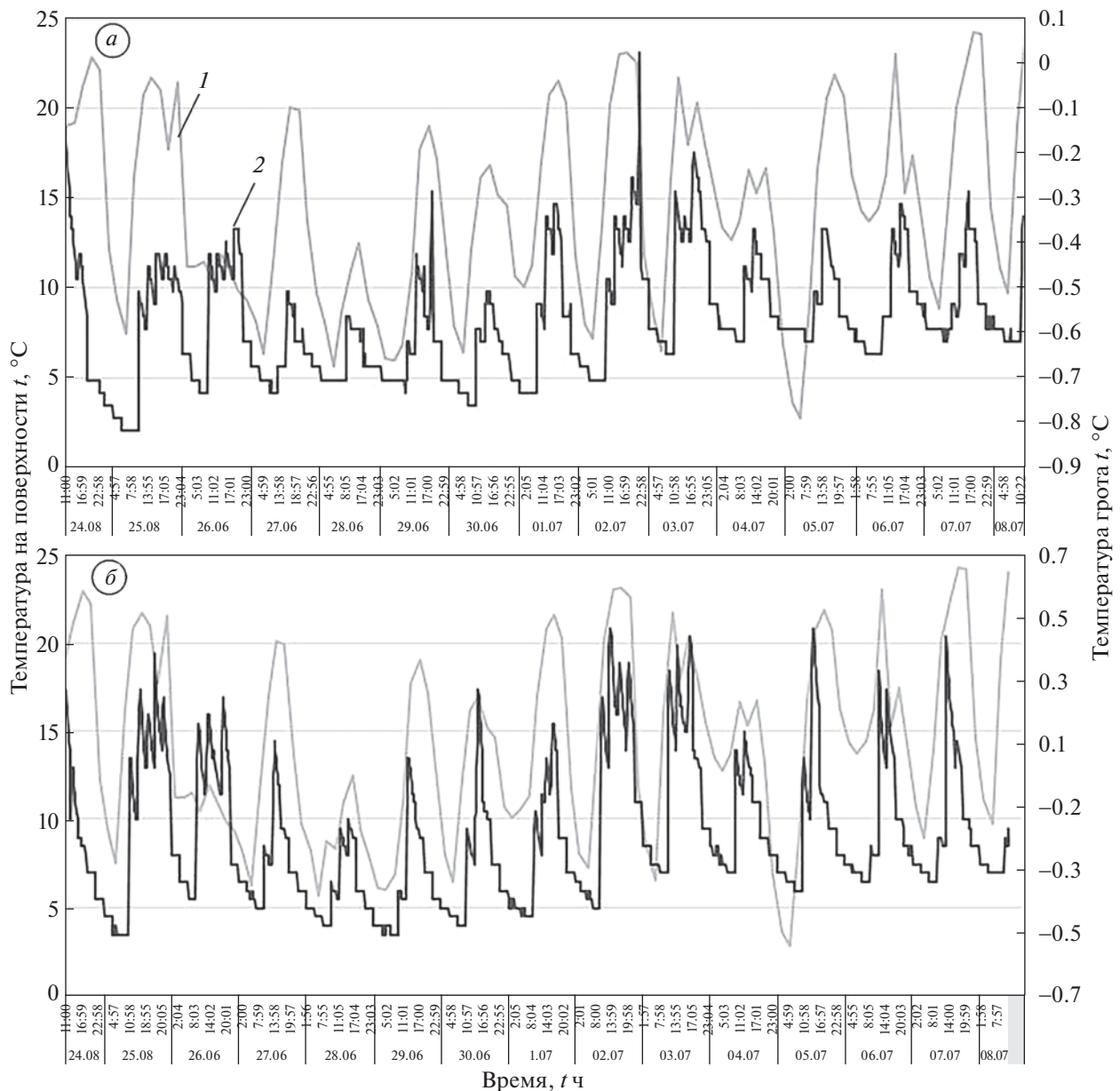


Рис. 2. Соотношение температуры воздуха на поверхности и в гротах Кунгурской Ледяной пещеры: *а* – грот Бриллиантовый; *б* – грот Данте; *1* – температура на поверхности; *2* – температура в гроте.

Fig. 2. Correlation of air temperature on the surface and in the grottoes of the Kungur Ice Cave: *a* – Brilliantovy Grotto; *b* – Dante Grotto; *1* – surface temperature; *2* – temperature in the grotto.

ла с поверхности возможен лишь через органичные трубы, трещины массива. В это время разрешённая туристическая пропускная способность составляет 25 человек в один заход при интервале заходов в 15 мин. За исследуемый период Кунгурскую Ледяную пещеру посетило более десяти тысяч человек. Максимальное прохождение людей зафиксировано в день открытия фестиваля воздухоплавания – 25 июня и составило 1314 человек (в это время режим работы пещеры был продлён). Минимальное количество людей (459) посетило

пещеру 28 июня. За один заход за весь период пещеру посещало от 1 (индивидуальная экскурсия) до 25 человек.

Температура тела – комплексный показатель теплового состояния организма человека. За нормальную температуру тела условно принимают температуру в подмышечной впадине здорового человека в 17 часов дня (36.4–36.8 °C) (Анисимова, 2007). Температура тела каждого человека в течение дня колеблется в небольших пределах, оставаясь в диапазоне от 35.5 до 37.2 °C для здоро-

вого человека (Кошкин и др., 2021). Даже незначительные колебания температуры тела играют важную роль в изменениях биоритмических функций организма. Сохранение температуры тела в пределах нормы — необходимое условие жизнедеятельности человека. Оптимальный тепловой режим, обеспечивающийся за счёт теплопродукции человека и тепловым состоянием среды, называется тепловым комфортом. Подземная среда не обеспечивает комфортных условий. Человек вынужден поддерживать тепловое равновесие за счёт физической и химической терморегуляции организма, одевать тёплую одежду, поскольку наш природный термостат слабо приспособлен к таким условиям, так как в большинстве случаев температура человеческого тела значительно превышает температуру подземной атмосферы. В воздухе теплопередача происходит тремя путями: излучением (45%), теплопроводностью (35%), испарением пота и нагревом вдыхаемого воздуха (20%) (Дублянский, 2000).

Чтобы оценить влияние экскурсантов на микроклиматические характеристики пещеры, построены графики изменения температуры при прохождении экскурсий (учитывали время захода группы в пещеру) за весь период исследования и в дни максимальной и минимальной нагрузки (рис. 3–5). На графиках отчётливо прослеживается тенденция повышения температуры в дневное время при посещении пещеры туристами, между заходами в пещеру и в вечернее и ночное время температура падает. В то же время величина достоверности аппроксимации (см. рис. 3) мала ($R^2 = 0–0.02$) и указывает на отсутствие зависимости между величинами. В гроте Бриллиантовый примерно через 11–15 минут после экскурсантов поднимается температура, а через 4–8 минут температура понижается. Для грота Данте характерно повышение температуры через 15 минут после остановки здесь туристов, а примерно через 7–12 минут температура снова опускается. В ночное время температурный режим в обоих гротах восстанавливается.

Учитывая, что перед экскурсией во входном тоннеле для экскурсантов проводится краткий инструктаж о мерах безопасности и поведении в пещере, время захода в грот Бриллиантовый смещается на 5 минут. В грот Данте посетители попадают через 10 минут после общего захода в пещеру. Следовательно, меняется время повышения температуры в гротах после экскурсии: в гроте Бриллиантовый оно составляет 6–10 минут, в гроте Данте — 5 минут. Возможно, пики посещения сдвинуты из-за положения датчиков (близость кровли гротов), количества экскурсантов в группе и минимального движения воздушных потоков в пещере в летний период, за счёт которого практически отсутствует перемешивание воздуха, выдыхаемого экскурсантами и подземной ат-

мосферой. Отмечено, что положение экскурсионной группы зависит от экскурсовода, то есть одна группа может стоять в центральной части грота или непосредственно под датчиком, другая — в отдалении. Иногда туристы задерживаются и отстают от группы, чтобы сделать фото, поэтому время нахождения туристов в гротах меняется. Период понижения температуры остаётся прежним.

Проанализировав данные отдельно по гротам, заходам в пещеру и изменениям микроклимата, установили, что независимо от количества туристов в группе температура в гротах повышается максимум на $0.1–0.2^\circ\text{C}$ или же остаётся неизменной, а местами отмечено и понижение температуры на 0.1°C .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые гроты (Бриллиантовый и Данте) входят в зону постоянных отрицательных температур, где ледяные образования присутствуют в течение всего года. Так, в летний период с 24 июня по 8 июля в гроте Бриллиантовый температура изменялась от -0.8 до 0.0°C , в гроте Данте — от -0.5 до $+0.5^\circ\text{C}$. Полученные результаты показали, что влияние посетителей на изменение в летний период микроклимата Кунгурской Ледяной пещеры невелико. Повышение температуры в течение суток в гротах на $0.1–0.2^\circ\text{C}$ никак не может повлиять на общий микроклиматический фон пещеры и, соответственно, отразиться на количестве льда и масштабе оледенения. Саморегуляция температуры после прохождения экскурсионной группы происходит в течение нескольких минут в дневное время, а ночью она полностью восстанавливается до тех пределов, которые были в утреннее время до открытия пещеры, с колебаниями в несколько десятых долей градуса, в зависимости от поверхностных условий.

Основную роль в изменении температурных показателей воздуха пещеры играют колебания температуры на поверхности, когда тёплые воздушные потоки проникают через трещины и вертикальные полости массива. Сравнивая данные тёплого летнего периода (июнь–август) в 2021 и 2022 гг. (табл. 1), наблюдаем тенденцию к повышению температуры на поверхности на 1.8°C : в 2021 г. средняя температура на поверхности составляла $+20^\circ\text{C}$, в 2022 г. — $+21.8^\circ\text{C}$. Такое изменение не могло не отразиться на температурном режиме в пещере: в этот период в гротах Бриллиантовый и Данте температура повысилась на 0.3°C (было -0.7 и -0.5°C , стало -0.4 и -0.2°C). Количество посетителей с июня по август составило в 2021 г. 50 тыс., в 2022 г. — почти 60 тыс. человек, наибольший приток туристов зафиксирован в июле. Согласно летнему режиму экскурсионной деятельности группы заходили в пещеру

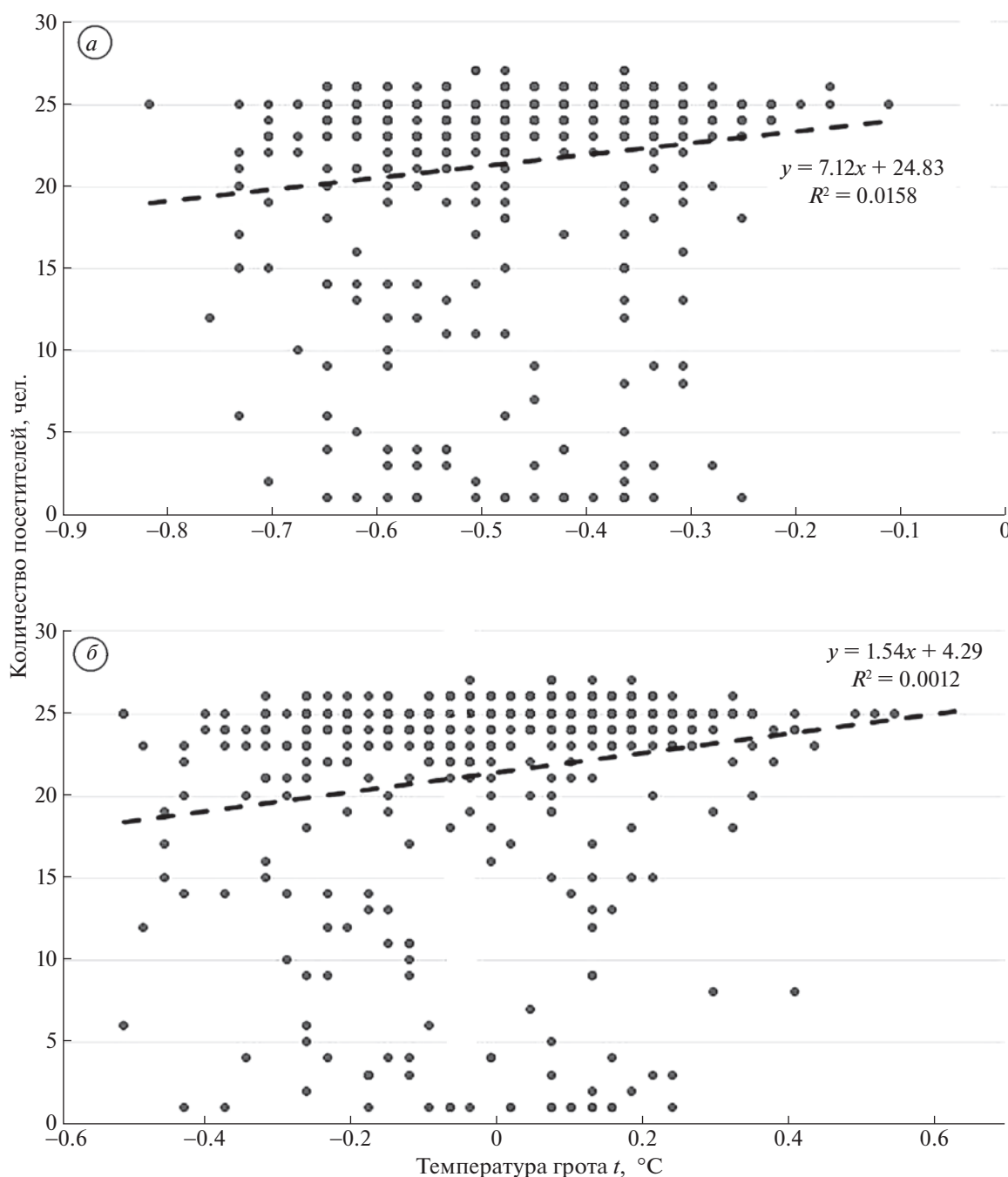


Рис. 3. Тенденция изменения температуры воздуха в гротах Кунгурской Ледяной пещеры при посещении пещеры туристами за весь период наблюдений (24 июня – 8 июля): а – грот Бриллиантовый; б – грот Данте.

Fig. 3. Air temperature trend in grottoes of the Kungur Ice Cave when tourists visit the cave for the entire observation period (24 June–8 July): а – Brilliantovy Grotto; б – Dante grotto.

каждые 15 минут, максимальное количество людей в группе 25 человек.

В то же время в гротах пещеры отмечается тенденция повышения температуры воздуха от начала летнего периода к его завершению (табл. 2): в гроте Бриллиантовый температура воздуха с -1.1°C (июнь 2022 г.) повысилась до -0.4°C (ав-

густ), в гроте Данте температура изменилась с -0.8 до -0.3°C . Количество же посетителей также увеличивается: если в июне Кунгурскую Ледяную пещеру посетило около 16 тыс. человек, то в августе уже 18 тыс. человек. Стоит отметить, что в июне изменение температуры в гротах от начала месяца к его концу было в пределах 0.5 – 0.7°C , а в

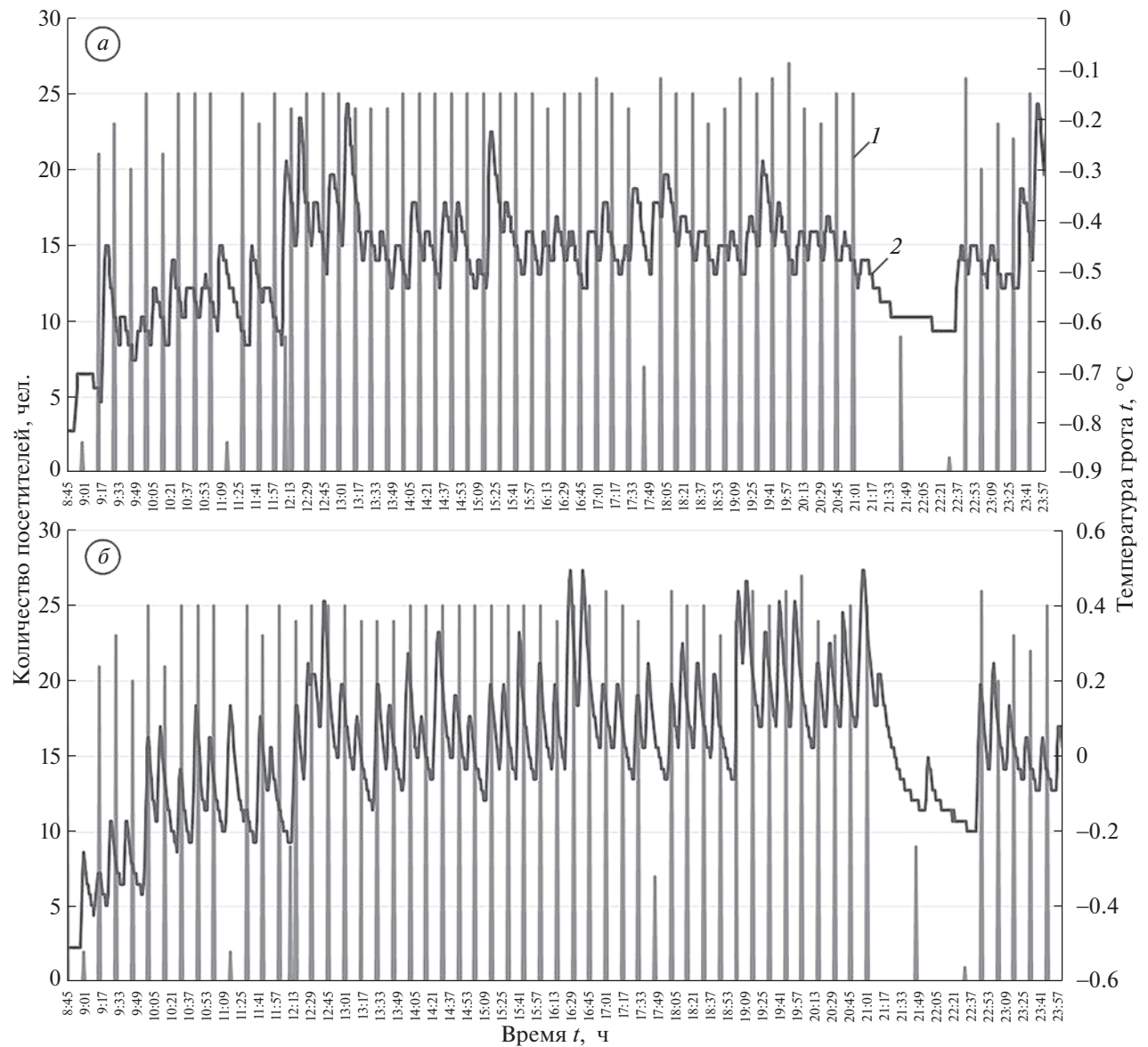


Рис. 4. Микроклиматические изменения в гротах Кунгурской Ледяной пещеры в день максимальной загрузки (25.06.2022): а – грот Бриллиантовый; б – грот Данте; 1 – количество посетителей; 2 – температура в гроте.

Fig. 4. Microclimatic changes in the grottoes of the Kungur Ice Cave on the day of maximum workload (25.06.2022): а – Brilliantov Grotto; б – Dante grotto; 1 – the number of visitors; 2 – temperature in the grotto.

августе -0.1°C . В июне чётко прослеживается связь между температурой воздуха в пещере и на поверхности ($r = 0.79$, при $r_{\text{crit}} = 0.45$ при $\alpha = 0.01$, $R^2 = 0.62$), связь между количеством туристов и температурой воздуха в пещере в гротах статистически незначима ($r = 0.43$, $R^2 = 0.18$). В августе связь между параметрами отрицательна ($r = -0.03... -0.05$), в это время карстовый массив достиг

Таблица 1. Средние данные по температуре воздуха и количеству посетителей за тёплый летний период (июнь–август) 2021–2022 г.

	Температура на поверхности (средняя), $^{\circ}\text{C}$	Температура в гроте (средняя), $^{\circ}\text{C}$		Количество посетителей, тыс. чел
		Бриллиантовый	Данте	
2021	+20	−0.7	−0.5	50072
2022	+21.8	−0.4	−0.2	56286

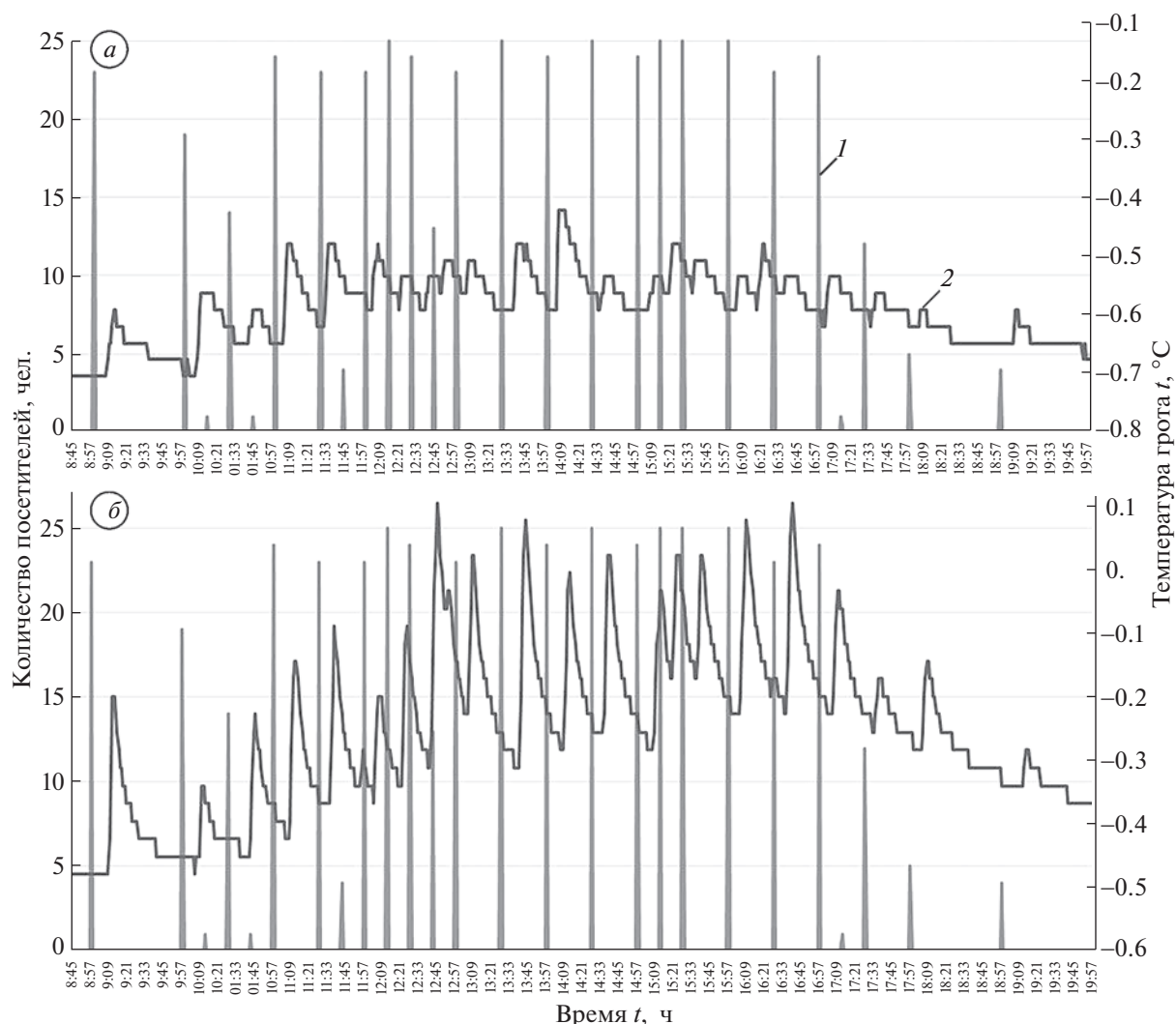


Рис. 5. Микроклиматические изменения в гротах Кунгурской Ледяной пещеры в день минимальной загрузки (28.06.2022): а – грот Бриллиантовый; б – грот Данте; 1 – количество посетителей; 2 – температура в гроте.

Fig. 5. Microclimatic changes in the grottoes of the Kungur Ice Cave on the day of minimum workload (28.06.2022): а – Brilliantovy grotto; б – Dante grotto; 1 – the number of visitors; 2 – temperature in the grotto.

устойчивой температуры, поэтому колебания её в гротах несущественны и влияние температуры воздуха на поверхности и посетителей на изменение микроклимата пещеры также невелико. Для сравнения, во время пандемии в мае 2020 г. ни один человек не посетил пещеру. В это время суточные колебания температуры воздуха в гротах Бриллиантовый и Данте составили 0.1°C , средняя температура в гроте Бриллиантовый была -0.9°C , Данте – -0.7°C , при этом средняя температура воздуха на поверхности за май зафиксирована на уровне $+13.3^{\circ}\text{C}$.

Оценка динамики изменения оледенения в Кунгурской Ледяной пещере позволяет заключить, что в течение года происходят и прирост и потеря льда. В летнее время часть льда в некоторых гротах зоны постоянных отрицательных тем-

ператур (Бриллиантовый, Данте) тает, а, например, в гротах зоны переходных температур (Крестовый), наоборот, нарастает. Как показывают многолетние мониторинговые исследования, границы постоянного оледенения остаются неизменными, а наибольший вклад в абляцию вносит испарение снежно-ледяных образований в зимний период, а не их таяние в летнее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение посещаемости туристическими группами Кунгурской Ледяной пещеры в летний период (июль) незначительно влияет на изменение микроклиматических параметров, а также на оледенение. Проанализированные данные в двух гротах зоны постоянных отрицательных темпера-

Таблица 2. Ежемесячные данные по температуре воздуха и количеству посетителей за весь тёплый летний период (июнь–август) 2022 г.

	Температура в гроте (средняя), °С		Количество посетителей, тыс. чел
	Бриллиантовый	Данте	
Июнь	–1.1	–0.8	15801
Июль	–0.6	–0.4	21989
Август	–0.4	–0.3	18496

тур (Бриллиантовый и Данте) и постоянного оледенения показали, что даже при максимальной туристической нагрузке (825–925 человек в день и более) температура в течение дня не изменяется или поднимается на 0.1–0.2°С, а иногда и понижается. Последнее как раз может указывать на то, что человеческий фактор не влияет на изменение температурного режима пещеры. При этом время восстановления температуры после прохождения каждой группы туристов в дневное время достигает 4–12 минут, в ночное время температура снижается и температурный режим полностью восстанавливается.

Изменение внешней температуры воздуха отражается на оледенении через изменение в пещере запаса холода, но не от посетителей. Остановка туристических групп в летний период в первых двух гротах (Бриллиантовый, Полярный) запрещена, в гроте Данте из-за большого объёма галереи влияние туристов на снежно-ледяные образования отсутствует. Постоянный контроль за снежно-ледяными образованиями и их объёмами показывает, что изменение состояния ледяных образований происходит в зимний период за счёт испарения, а не за счёт таяния в летний период.

Основное влияние на микроклимат пещеры оказывают поверхностные условия, на это указывают высокие значения коэффициента корреляции между температурой воздуха в пещере и на поверхности ($r = 0.79$). Наблюдается повышение температуры воздуха на поверхности и в гротах пещеры от начала летнего сезона к его окончанию. Туристический поток также растёт, но в пещере к этому времени устанавливаются такие условия, при которых температура воздуха в течение месяца изменяется на 0.1°С и влияние туристов на температурный режим и оледенение минимально.

Кунгурская Ледяная пещера — уникальный природный объект регионального значения, используемый для массового экскурсионного посещения. На протяжении более 70 лет она изучается специалистами и поэтому несёт значительную информационную нагрузку и также обладает большой эстетической ценностью. Исследования, проведённые авторами, обосновали необходимость следить за температурным режимом

Кунгурской Ледяной пещеры, контролировать доступ воздуха через шлюзовые двери, что создаёт условия для сохранения и восстановления снежно-ледяных образований, а также в условиях активной туристической нагрузки позволяет вести подсчёт, определять и регулировать оптимальное количество туристов, чтобы не навредить естественной среде пещеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андрейчук В.Н., Дорофеев Е.П. Антропогенный фактор и Кунгурская пещера // Кунгурская Ледяная пещера. 1995. Вып. 1. С. 85–99.
- Анисимова Н.В. Термометрия как метод функциональной диагностики // Известия Пермского гос. пед. ун-та. Физиология и гигиена человека. 2007. № 5 (9). С. 36–38.
- Дублянский В.Н. Занимательная спелеология. Челябинск: Изд-во Урал ЛТД, 2000. 528 с.
- Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н., Кадебская О.И., Кадебский Ю.В., Катаев В.Н., Лавров И.А., Лаврова Н.В., Мавлюдов Б.Р., Максимович Н.Г., Молоштанова Н.Е., Назарова У.В., Никифорова И.А., Паньков Н.Н., Пятунин М.С., Худенькая К.О., Шувалов В.М. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 385 с.
- Кадебская О.И. Изменение микроклимата и загрязнение карстовых вод в Кунгурской Ледяной пещере // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых. Сб. докладов. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2002. С. 2019–2022.
- Кадебская О.И. Влияние туристско-экскурсионной деятельности на тепловой баланс Кунгурской Ледяной пещеры // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. 19–23 апр. 2004 г. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2004. С. 56–58.
- Кадебская О.И. Экологический менеджмент в пределах особо охраняемой природной территории регионального назначения “Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера” // Географич. вестник. 2008. № 2 (8). С. 214–221.
- Кадебская О.И., Дублянский В.Н. По Кунгурской Ледяной пещере. Пермь: 2004. 91 с.

- Казанцева А.С., Кадебская О.И. Динамика оледенения в Кунгурской Ледяной пещере // Географич. вестник. 2017. № 4 (43). С. 5–11.
- Казанцева А.С., Красиков А.В. Сезонные вариации газового состава воздуха в Кунгурской Ледяной пещере // Горное эхо. Пермь: Вестник Горного ин-та УрО РАН, 2017. № 2 (67). С. 33–37.
- Кошкин М.Д., Плотникова К.Р., Котилевец И.Д. О некоторых особенностях мониторинга температуры пациента // Актуальные вопросы развития современной цифровой среды. Волгоград: Изд-во “Издательский дом Сириус”, 2021. С. 105–111.
- Красиков А.В. Уточнение морфометрических показателей гротов и галерей Кунгурской ледяной пещеры по результатам топографо-геодезических работ // Изв. вузов. Горный журнал. 2022. № 4. С. 76–89.
- Красиков А.В., Казанцева А.С. Факторы, влияющие на динамику содержания CO₂ в пределах подземного пространства (на примере Кунгурской Ледяной пещеры) // Сыктывкар: Вестник института геологии КомиНЦ УрО РАН, 2019. № 9. С. 3–9.
- Лобанов Ю.Е. Отрицательные температурные аномалии и морфология пещер в карбонатных массивах // Аккумуляция зимнего холода в горных породах и его использование в народном хозяйстве. Пермь: 1981. С. 28–30.
- Лукин В.С. Наблюдения за воздушным режимом закарстованных массивов на примере Кунгурской Ледяной пещеры // Свердловск: Тр. Ин-та геологии УФАН СССР, 1962. Вып. 62. С. 107–119.
- Ляхницкий Ю.С., Чуйко М.А. Комплексные исследования Каповой пещеры // Пещеры. 1999. Вып. 25–26. С. 21–37.
- Ляхницкий Ю.С., Юшко А.А., Минников О.А., Червяцова О.Я. Результаты комплексных исследований Каповой пещеры (Шульган-Таш) и проблема её сохранения // Спелеология и спелестология: сб. материалов конф. 2010. № 1. С. 13–17.
- Мавлюдов Б.Р., Кудерина Т.М., Грабенко Е.А., Медведев А.А., Экба Я.А. Климат Новоафонской Пещеры // Вопросы географии. Спелеология и карстосведение. 2018. № 147. С. 218–243.
- Цикаришвили К.Д. Изучение микроклимата Новоафонской пещеры // Пещеры Грузии. 1978. № 7. С. 17–25.
- Щеховский Е.А., Кустикова М.А. Характеристика Танечкиной (Староладожской) пещеры как зимовки рукокрылых // Московский экономический журнал. 2020. № 6. С. 1–24.

Citation: Kazantseva A.S., Krasikov A.V. Anthropogenic influence on the microclimate and glaciation of the Kungur Ice Cave during the period of maximum tourist load. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (4): 612–624 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423040087

Anthropogenic Influence on the Microclimate and Glaciation of the Kungur Ice Cave during the Period of Maximum Tourist Load

A. S. Kazantseva^{a,b,#} and A. V. Krasikov^a

^aMining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

^bPerm State University, Perm, Russia

[#]e-mail: kazanalena@bk.ru

Received January 25, 2023; revised July 6, 2023; accepted October 2, 2023

The Kungur Ice Cave is visited by thousands of tourists every year, so the question of anthropogenic influence on changing its state is acute. Snow and ice formations are the main attraction of the cave. From the moment of discovery and improvement of the cave, the thickness of glaciation began to depend not only on natural, but also on technical and anthropogenic conditions. First, this is a change in the temperature of the outside air, the annual rise of underground and surface waters (the Sylva River), the construction of inlet and outlet tunnels, artificial ventilation, and the number of tourists. To assess the impact of the flow of tourists on the microclimatic characteristics of the Cave, the staff of the Kungur Stationary Laboratory conducted research during the period of maximum anthropogenic load in the summer of 2022. The data analyzed in this article made it possible to clarify that the existing tourist load has an insignificant impact on the microclimate of the Cave. After the passage of each group of tourists, the air temperature in the grottoes slightly increases (by a maximum of 0.1–0.2°C) but is restored during the daytime within 4–12 minutes, and at night the temperature regime is completely restored. The maximum tourist load per day is 825–925 people or more, depending on the operating mode of the Cave. Thus, the visiting regulations and the allowed throughput of the cave are currently chosen correctly. The number of tourists is not so large as to limit the visit to the Cave to protect the ice formations, especially since the first-year ice is renewed every winter.

Keywords: Kungur Ice Cave, microclimate, glaciation, anthropogenic impact, thermal pollution

REFERENCES

- Andreychuk V.N., Dorofeev E.P. Anthropogenic factor and Kungur cave. *Kungurskaya ledyanaya peshchera*. Kungur Ice Cave. 1995. № 1: 85–99 [In Russian].
- Anisimova N.V. Thermometry as a method of functional diagnostics. *Izvestiya PGPU. Fiziologiya i gigiena cheloveka*. News of the PGPU. Physiology and hygiene of a person. 2007, 5 (9): 36–38 [In Russian].
- Dublyansky V.N. Entertaining speleology. Chelyabinsk: *Izdatel'stvo Ural LTD*. Ural Publishing House LTD, 2000: 528 [In Russian].
- Dublyanskaya G.N., Dublyansky V.N., Kadebskaya O.I., Kadebsky Yu.V., Kataev V.N., Lavrov I.A., Lavrova N.V., Mavlyudov B.R., Maksimovich N.G., Moloshtanova N.E., Nazarova U.V., Nikiforova I.A., Pankov N.N., Pyatunin M.S., Thin K.O., Shuvalov V.M., *Kungurskaya Ledyanaya peshchera: opyt rezhimnykh nablyudenij*. Kungurskaya Ice Cave: the experience of regime observations. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005: 385 [In Russian].
- Kadebskaya O.I. Microclimate changes and pollution of karst waters in the Kungur Ice Cave. *Problemy kompleksnogo monitoringa na mestorozhdeniyah poleznykh iskopayemykh. Sbornik dokladov*. Problems of integrated monitoring at mineral deposits. Collection of reports. Perm: Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002: 2019–2022 [In Russian].
- Kadebskaya O.I. The influence of tourist and excursion activities on the thermal balance of the Kungur Ice Cave. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov*. Strategy and processes of development of geo resources. Perm: Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004: 56–58 [In Russian].
- Kadebskaya O.I. Environmental management within the specially protected natural area of the regional destination “Ice Mountain and Kungur Ice Cave”. *Geograficheskij vestnik*. Geographical Bulletin. 2008, 2 (8): 214–221 [In Russian].
- Kadebskaya O.I., Dublyansky V.N. *Po Kungurskoj Ledyanoj peshchere*. On the Kungur Ice Cave. 2004: 91 [In Russian].
- Kazantseva A.S., Kadebskaya O.I. Dynamics of glaciation in the Kungur Ice Cave. *Geograficheskij vestnik*. Geographical Bulletin. 2017, 4 (43): 5–11 [In Russian].
- Kazantseva A.S., Krasikov A.V. Seasonal variations of the gas composition of the air in the Kungur Ice Cave. *Gornoe ekho. Vest. Gornogo in-ta UrO RAN*. Mountain echo. Perm: Bulletin of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017: 2 (67). 33–37 [In Russian].
- Koshkin M.D., Plotnikova K.R., Kotilevets I.D. About some features of patient temperature monitoring. *Aktual'nye voprosy razvitiya sovremennoj cifrovoj sredy*. Topical issues of the development of the modern digital environment. Volgograd: Sirius Publishing House, 2021: 105–111 [In Russian].
- Krasikov A.V. Clarification of morphometric indicators of grottos and galleries of the Kungur ice Cave based on the results of topographic and geodetic works. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. News of the Higher Institutions. Mining Journ. 2022, 4: 76–89 [In Russian].
- Kazantseva A.S., Krasikov A.V. Factors affecting the dynamics of CO₂ content within the underground space (on the example of the Kungur Ice Cave). *Bulletin of the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. Syktyvkar: Vestnik Instituta geologii Komi NTS UrO RAN. 2019, 9: 3–9 [In Russian].
- Lobanov YU.E. Negative temperature anomalies and morphology of caves in carbonate massifs. *Akkumulyatsiya zimnego kholoda v gornykh porodakh i ego ispol'zovanie v narodnom khozyajstve*. Accumulation of winter cold in rocks and its use in the national economy. Perm, 1981: 28–30 [In Russian].
- Lukin V.S. Observations of the air regime of karst massifs on the example of the Kungur Ice Cave. *Trudy In-ta geologii UFAN SSSR*. Sverdlovsk: Proc. of the Institute of Geology of the UFAN of the USSR. 1962, 62: 107–119 [In Russian].
- Lyakhnitskij Yu.S., Chujko M.A. Comprehensive research of the Kapova Cave. *Peshchery*. Caves. 1999, 25–26: 21–37 [In Russian].
- Lyakhnitskij, Yu.S., Yushko A.A., Minnikov O.A., Chervyatsova O.YA. The results of comprehensive studies of the Kapova Cave (Shulgan-Tash) and the problem of its conservation. *Speleologiya i spelestologiya: sbornik materialov konferencii*. Speleology and speleology: a collection of conference materials. 2010, 1: 13–17 [In Russian].
- Mavlyudov B.R., Kuderina T.M., Grabenko E.A., Medvedev A.A., Ehkba Ya.A. Climate of the New Athos Cave. *Voprosy geografii. Speleologiya i karstovedenie*. Questions of geography. Speleology and karst studies. 2018, 147: 218–243 [In Russian].
- Sikarishvili K.D. Study of the microclimate of the New Athos cave. *Peshchery Gruzii*. Caves of Georgia. 1978, 7: 17–25 [In Russian].
- Shchekhovskij E.A., Kustikova M.A. Characterization of the Tanechkina (Staraya Ladoga) cave as a wintering place for bats *Moskovskij ehkonomicheskij zhurnal*. Moscow Economic Journ. 2020, 6: 1–24 [In Russian].