

В.А. Ульянов¹✉, А.С. Деревнина^{2,3},
М.Б. Козликин²✉, М.В. Шуньков²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Россия

²Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

E-mail: v.a.ulyanov@yandex.ru; kmb777@yandex.ru

Особенности криптоклимата и конденсации атмосферной влаги в южной галерее Денисовой пещеры: первые результаты исследования

Впервые в Денисовой пещере проведены сопряженные наблюдения за конденсацией атмосферной влаги, температурой, влажностью и циркуляцией воздуха внутри карстовой полости, которая на протяжении ок. 300 тыс. лет служила убежищем первобытному человеку. Наблюдения позволили подтвердить сделанные ранее выводы о стабилизирующем действии скального массива на ход температуры воздуха и выявить резкую дифференциацию температуры и абсолютной влажности воздуха по высоте внутри пещерной полости. Установлено, что около 50 % влаги поступающего извне в южную галерею пещеры воздуха оседает в присводовой части галереи в зоне на расстоянии не более 2 м от свода. Следствием этих процессов является неравномерное распределение объемов капающего на грунт конденсата. Анализ суточного хода температуры в точках наблюдения и субъективные феноменологические оценки позволили эмпирически установить и статистически подтвердить корреляционную связь между направлением и интенсивностью воздухообмена южной галереи с внешней средой и разницей температуры воздуха внешней среды и температуры скальной стенки галереи. Результаты наблюдения позволили предположить, что микроклиматические условия обитания первобытного человека в Денисовой пещере определялись не только и не столько температурой воздуха, сколько комфортной или некомфортной влажностью, зависящей от разницы температуры внешнего воздуха и температуры коренного скального массива. Наблюдения за микроклиматом в южной галерее Денисовой пещеры показали перспективность продолжения исследований в течение более длительного времени для решения климатостратиграфических, палеогеографических и палеоэкологических задач.

Ключевые слова: Алтай, Денисова пещера, микроклиматические условия, криптоклимат, температура, конденсационная влага.

V.A. Uliyanov¹✉, A.S. Derevnina^{2,3},
M.B. Kozlikin²✉, M.V. Shunkov²

¹Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

²Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia

E-mail: v.a.ulyanov@yandex.ru; kmb777@yandex.ru

Features of Cryptoclimate and Condensation of Atmospheric Moisture in the South Chamber of Denisova Cave: First Results

For the first time in Denisova Cave, we conducted combined observations on the condensation of atmospheric moisture, temperature, humidity, and air circulation inside the karst cavity, which served as a refuge for ancient people during about 300,000 years. Observations confirmed the previously stated conclusions about the stabilizing effect of the rock massif on the course of air temperatures and revealed a sharp differentiation of temperature and absolute humidity by height inside the cave. We found that

about 50 % of the moisture from the air entering the South Chamber of the cave from outside settles in the arch part of the chamber in the area at a distance of not more than 2 m from the arch. As a result, the volumes of condensate dripping onto the ground are unevenly distributed. Analysis of the daily temperature course at observation points and subjective phenomenological assessments made it possible to empirically establish and statistically confirm the correlation between the direction and intensity of air exchange between the South Chamber and the external environment and the difference in air temperatures of the external environment and the temperatures of the rock wall of the chamber. The observations allowed us to assume that the microclimatic conditions of the ancient human communities in Denisova Cave were determined not only and not so much by air temperature as by comfortable or uncomfortable humidity, depending on the difference in the outside air temperature and the temperature of the bedrock massif. The obtained results of microclimate observations in the South Chamber of Denisova Cave showed the prospects for continuing research over a longer period to solve climatostratigraphic problems.

Keywords: *Altai, Denisova Cave, microclimatic conditions, crytoclimate, temperature, condensation moisture.*

Изучение сезонной и годовой динамики микроклиматических условий в обитаемых скальных убежищах необходимо для понимания причин сезонной ритмики заселения пещер человеком. Кроме того, выявление источников и объемов поступающей в карстовую полость влаги позволяет определить особенности протекания спелеолитоморфогенеза и возникновения постседиментационных деформаций в заполняющих карстовую полость рыхлых отложениях, пластический или разрывной характер которых в значительной мере зависит от степени увлажнения грунта. В изолированных от прямого проникновения грунтовых и атмосферных вод пещерах основным источником увлажнения является оседающий на поверхности полости конденсат.

Многолетние феноменологические наблюдения в процессе археологических исследований в Денисовой пещере позволили установить, что характер увлажнения воздуха и рыхлых отложений существенно меняется в течение года. В холодное время года, как правило, отмечается иссушение стен и грунта, а в теплое – происходит интенсивное увлажнение. Сезонные закономерности, в свою очередь, связаны с суточными флуктуациями – наиболее интенсивное образование конденсата в пещерной полости наблюдается преимущественно в дневное время, существенно снижаясь или полностью прекращаясь вечером и ночью.

Вопросы термического режима, воздухообмена и конденсации атмосферной влаги в карстовых массивах изучаются отечественными специалистами с середины прошлого века [Лукин, 1965; Дублянский, 2000], вместе с тем эти вопросы рассматривались вне контекста среды обитания первобытного человека. Проведенные ранее климатологические исследования в Денисовой пещере были сосредоточены на изучении годовых колебаний температур воздуха и не предусматривали наблюдений за влажностью и образованием конденсата в пещере [Шуников, Агаджанян, 2007]. Однако наблюдения за конденсацией влаги, температурой, влажностью и циркуляцией воздуха внутри карстовой полости, которая на протяжении ок. 300 тыс. лет служила убежищем человеку, существенно дополняют археологические, палеонтологические, геоморфологические и климатостратиграфические данные для реконструкции палеоклиматической обстановки и палеоэкологической ситуации

на Алтае в плейстоцене. Для оценки микроклиматических условий в Денисовой пещере в 2024 г. была проведена серия рекогносцировочных замеров температуры и влажности воздуха и скального массива, сопряженных с измерениями объемов оседающей на стенах и капающей на грунт конденсационной влаги.

В течение трех дней в семи эмпирически выявленных основных и нескольких вспомогательных точках в зонах наиболее активной атмосферной циркуляции на разных гипсометрических уровнях внутри южной галереи и вне пещеры проводились измерения температуры и относительной влажности воздуха с периодичностью от 1 до 5 часов. Точка 1 расположена на предвходовой площадке, под капельной линией. Точки 2 и 3 находятся у северной и южной стен южной галереи на высоте 0,1 м от нулевого репера пещеры – наиболее часто фиксируемом уровне границы образования конденсата. Точки 4–6 установлены в глубине южной галереи на уровнях –1,0, –2,0 и –5,3 м соответственно. Точка 7 расположена в скальной стене южной галереи на высоте 0,7 м. В скальном массиве температура породы измерялась в шпурах диаметром 0,8 см, пробуренных на глубину 10 см. Измерения влажности проводились термогигрометром DT-625 с заявленной приборной погрешностью $\pm 3,0$ % RH. Измерения температуры проводились с помощью электрических термодатчиков с заявленной погрешностью измерений $\pm 0,1$ °C. В связи с заметной систематической погрешностью некоторых датчиков (от 0,4 до 0,8 °C) была проведена их совместная поверка и калибровка с использованием метеорологического термометра типа ТМ-6 (исполнение 1) производства VEB Thermometerwerk Geraberg в соответствии с методическими рекомендациями по испытанию метеорологических термометров (ГОСТ 112-78). Результаты измерений каждого датчика пересчитывались в соответствии с его персональной калибровочной шкалой. Проверочные измерения показали высокую повторяемость результатов каждого датчика в актуальном температурном диапазоне (4–30 °C). Погрешность повторных измерений не превышала 0,2 °C, оставаясь преимущественно в пределах 0,1 °C.

Оценка объемов конденсационной влаги проводилась путем сбора воды в 11 водосборных емкостей

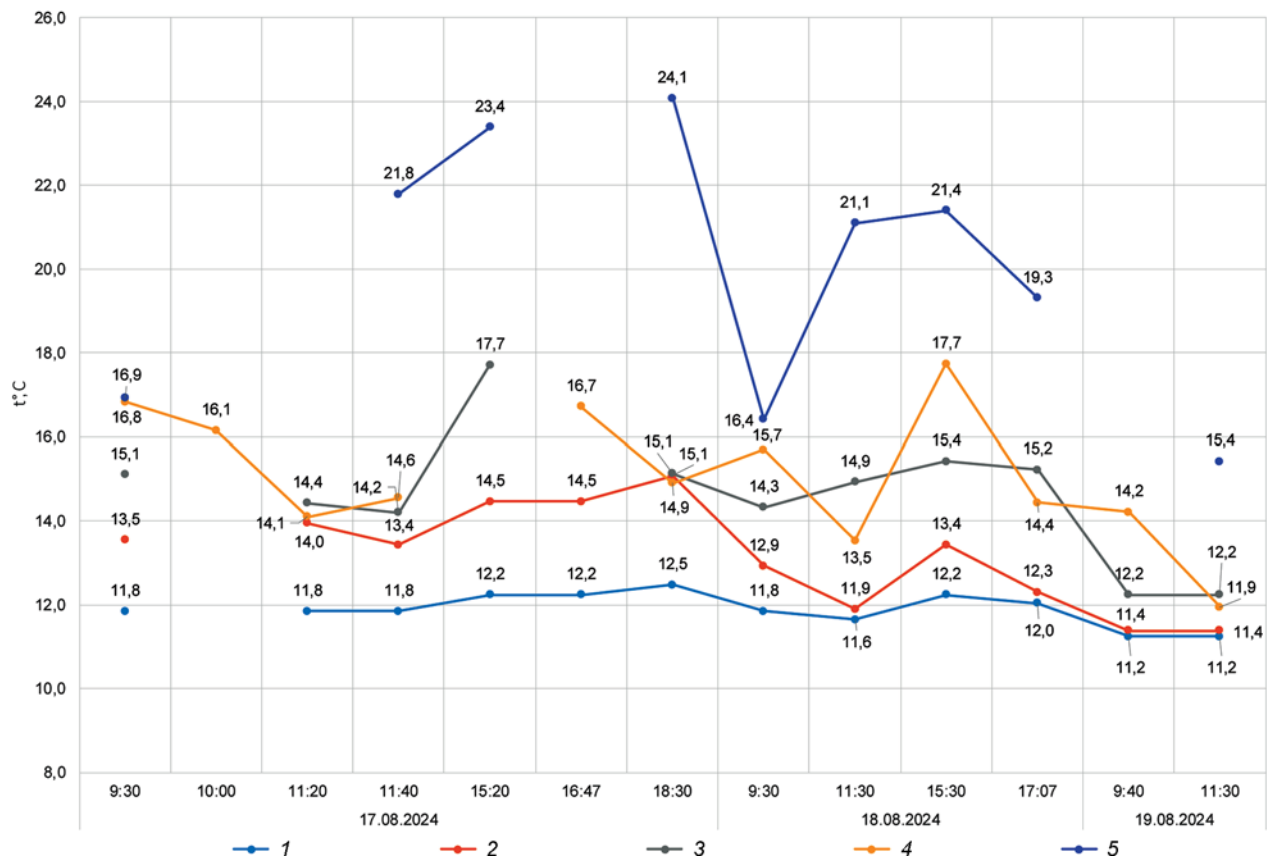


Рис. 1. Суточный ход температуры в южной галерее Денисовой пещеры с 17.08.2024 по 19.08.2024 г.

1 – $t^{\circ}\text{C}$ скалы на отметке 0,7 м; 2 – $t^{\circ}\text{C}$ воздуха у скалы на отметке 0,7 м; 3 – $t^{\circ}\text{C}$ воздуха в присводовой части на отметке 1 м; 4 – $t^{\circ}\text{C}$ воздуха у основания хода галереи 2 на отметке 1,05 м; 5 – $t^{\circ}\text{C}$ воздуха на предвходовой площадке.

Таблица 1. Корреляция между температурой внешнего воздуха и воздуха внутри Денисовой пещеры

Дата и время измерений	t° воздуха у скалы (высота 0,7 м)	t° воздуха под сводом южной галереи (высота 1,0 м)
17.08.2024 9:30	13,5	15,1
17.08.2024 11:40	13,4	14,2
17.08.2024 15:20	14,5	17,7
17.08.2024 18:30	15,1	15,1
18.08.2024 9:30	12,9	14,3
18.08.2024 11:30	11,9	14,9
18.08.2024 15:30	13,4	15,4
18.08.2024 17:07	12,3	15,2
19.08.2024 11:30	11,4	12,2
К корреляции (Пирсона) с температурой воздуха вне пещеры (предвходо- вая площадка)	0,68	0,65

размером 22×17 см и площадью водосбора 367 см^2 , вплотную расставленных в поперечном створе южной галереи протяженностью 2,1 м. Собранная в каждую емкость вода взвешивалась на тензорных весах с заявленной приборной погрешностью $\pm 0,01$ г.

Наблюдения показали, что суточный ход температуры внутри пещерной полости с меньшими абсолютными значениями и меньшей амплитудой повторяет изменения температуры воздуха вне пещеры – при максимальной зафиксированной амплитуде температуры наружного воздуха в $13,0^{\circ}\text{C}$ разница температуры воздуха внутри южной галереи не превышает $4,3^{\circ}\text{C}$. Эта закономерность определяется, очевидно, стабилизирующим действием скального массива. График суточного хода температуры (рис. 1) демонстрирует, что наибольшей тепловой инерцией обладают коренные породы, у которых суточные изменения температуры не превысили $0,8^{\circ}\text{C}$.

Примечательна синхронность изменений температуры воздуха вне пещеры

с температурой воздуха в верхней части южной галереи (коэффициенты корреляции 0,65 и 0,68), что свидетельствует о высокой скорости воздухообмена пещерной полости с внешней средой. Этот механизм обуславливает интенсивное поступление извне теплого насыщенного влагой воздуха, который обеспечивает быстрое образование конденсата на холодной поверхности пещерной полости (табл. 1).

Установлено, что в течение дня абсолютная влажность внешнего воздуха при первоначальном проникновении в пещеру меняется незначительно, однако внутри пещерной полости начинает резко дифференцироваться по высоте (рис. 2). Например, замеры 17 августа в 9:30 показали на предвходовой площадке относительную влажность воздуха 87,0 % с температурой 16,9 °С, что соответствует абсолютной влажности 13,0 г/м³. По мере прогревания наружного воздуха наблюдалось падение его относительной влажности, и в 11:40 при температуре 21,8 °С относительная влажность составила 62,2 %. Однако абсолютная влажность изменилась незначительно и составила 12,4 г/м³. За этот же период времени вблизи свода галереи на высотной отметке 1,0 м температура воздуха составляла 14,5 °С при относительной влажности 94–97 %, что соответствует абсолютной влажности 11,8–12,4 г/м³. Но уже в 1,3 м ниже, на отметке –0,3 м, где температура воздуха относительно стабильно держалась в диапазоне от 10,7 до 11,0 °С, показатели относительной влажности 77–81 % соответствовали абсолютной влажности 8,0–8,3 г/м³.

Контрольные замеры параметров воздуха в средней и нижней частях галереи показали весьма низкие значения влажностных градиентов на отметках ниже –1,0 м. В частности, на отметке –1,0 м воздух с температурой 9,4 °С при относительной влажности 70,6 % содержал 6,4 г/м³ воды, на отметке –2,0 м воздух с температурой 7,4 °С при относительной влаж-

ности 85,6 % содержал 6,8 г/м³; и на отметке –5,3 м вблизи днища раскопа воздух с температурой 4,2 °С имел относительную влажность 94,2 %, что соответствует плотности паров воды 6,1 г/м³.

Эти данные демонстрируют, что при проникновении в полость галереи наружный воздух теряет в подводящих карстовых каналах сравнительно небольшое количество влаги – около 0,6 г воды на м³, или около 5 % первоначальной влажности. Основные влагопотери воздуха происходят в процессе его опускания на 1,3 м ниже свода, составляя более 4 г/м³ (еще ок. 35 %) первоначальной влажности. При дальнейшем опускании в нижние зоны галереи воздух теряет еще ок. 2 г/м³ к уровню –1,0 м (2 м ниже свода галереи), что составляет немногим более 15 % первоначальной влажности. При опускании воздуха ниже отметки –1,0 м потери влажности инструментально не выявлены, поскольку они меньше погрешности измерений приборов. Таким образом, прошедший через галерею наружный воздух суммарно теряет около 55 % первоначально содержащейся в нем влаги, причем около 50 % оседает в пределах верхних 2 м от свода галереи. Следовательно, общий объем остающейся в пещере воды в основном определяется направленностью и интенсивностью воздухообмена в наиболее высокой – присводовой части галереи.

Основным каналом воздухообмена южной галереи с внешней средой является галерея 2 – узкий извилистый сквозной ход в южной коренной стене пещеры протяженностью ок. 10 м на границе южной галереи и центрального зала, выходящий над предвходовой площадкой на 5,7 м выше нулевого репера пещеры. В процессе наблюдений был отмечен необычный характер изменения суточной циркуляции входящего извне и покидающего южную галерею воздуха, на первый взгляд, нарушающий элементарные зако-

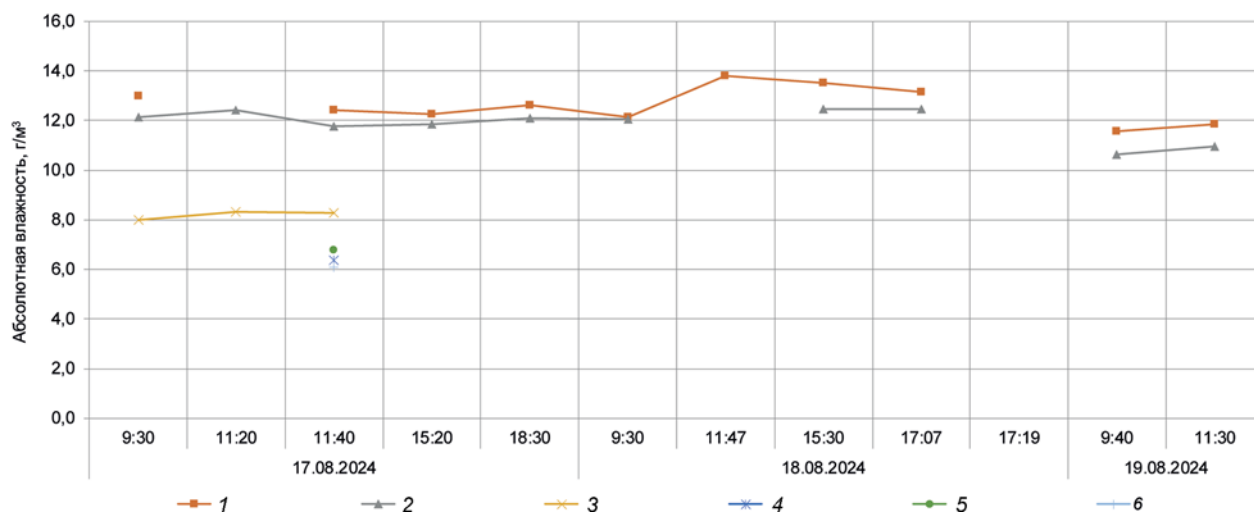


Рис. 2. Изменение абсолютной влажности воздуха на разных высотных уровнях в южной галерее Денисовой пещеры.

1 – точка 1 (предвходовая площадка); 2 – точка 2 (1 м); 3 – точка 2.1 (–0,3 м); 4 – точка 4 (–1 м); 5 – точка 5 (–2 м); 6 – точка 6 (–5,3 м).

Таблица 2. Корреляция скорости и направления движения воздуха в галерее 2 Денисовой пещеры

Дата и время измерений	t° воздуха в точке 1 (предвходовая площадка)	t° в точке 7 (скальная стена южной галереи), высота 0,7 м	t° воздуха в точке 7 (рядом со скальной стеной южной галереи), высота 0,7 м	t° воздуха в точке 2 (южная галерея), высота 1,0 м	Разница температур в точках 1 и 7	Условный ранг интенсивности движения воздуха в галерее 2
17.08.2024 9:30	16,9	11,8	13,5	15,1	5,1	–1,0
17.08.2024 11:40	21,8	11,8	13,4	14,2	10,0	2,0
17.08.2024 15:20	23,4	12,2	14,5	17,7	11,1	2,0
17.08.2024 18:30	24,1	12,5	15,1	15,1	11,6	0,0
18.08.2024 9:30	16,4	11,8	12,9	14,3	4,6	–1,0
18.08.2024 11:30	21,1	11,6	11,9	14,9	9,5	3,0
18.08.2024 15:30	21,4	12,2	13,4	15,4	9,2	2,0
18.08.2024 17:07	19,3	12,0	12,3	15,2	7,3	1,0
19.08.2024 11:30	15,4	11,2	11,4	12,2	4,2	–1,0
К корреляции (Пирсона) с направлением и интенсивностью движения воздуха в галерее 2	0,69	0,25	0,05	0,48	0,73	–

номерности естественной конвекции газов, которые заключаются в том, что более холодные воздушные массы должны опускаться вниз, а более теплые подниматься вверх. В частности, регулярно наблюдаются ситуации, когда в утренние часы более холодный по сравнению с температурой воздуха вне пещеры воздух из южной галереи устремлялся вверх по галерее 2. Через несколько часов по мере роста дневной температуры направление движения воздуха менялось на противоположное. Теперь через галерею 2 более теплый воздух поступал извне в южную галерею. Вечером направление движения воздуха снова менялось – воздух из южной галереи, став холоднее воздуха снаружи, покидал южную галерею через галерею 2, поднимаясь вверх.

Анализ суточного хода температуры в точках наблюдения и субъективные феноменологические оценки позволили выявить связь между градиентами температуры внешних воздушных масс и температуры на некоторых участках скального массива внутри галереи (см. рис. 1). Для выявления корреляционных связей качественные оценки направления и интенсивности движения воздуха в галерее 2 были переведены в условную ранговую шкалу (табл. 2). Выходящий из южной галереи наружу воздух, как правило, шел через галерею 2 с малой интенсивностью и был закодирован оценочным рангом –1. Входящий в юж-

ную галерею воздух, в зависимости от субъективно определяемой скорости потока, получил ранги от 1 до 3. Отсутствие ощущаемого движения воздуха кодировалось рангом 0.

Статистические показатели свидетельствуют о наиболее тесной корреляционной связи (коэффициент корреляции Пирсона 0,73) между направлением движения воздуха в галерее 2 и разницей между температурой воздуха внешней среды и температурой скальной стенки галереи. Тем не менее корреляция, построенная на оценках субъективного восприятия, не является достаточно точной в количественном отношении. Оценки направления и скорости движения воздуха в будущем следует верифицировать инструментальными методами.

Контрольный сбор конденсирующейся и стекающей с внутренних поверхностей пещеры воды проводился в течение 15 часов подряд преимущественно в ночное время. Общее количество собранной воды составило 19,98 г, что в среднем составляет 1,81 г воды на каждую водосборную емкость. Вместе с тем значения в каждой емкости резко различались – от полностью сухих до превышающих среднее в 2–3 раза. Водосборные емкости, находившиеся в пределах 0,3 м от восточной стены южной галереи и 0,5 м от ее западной стены (емкости 1, 10 и 11), были сухими. Максимальное количество воды – при-

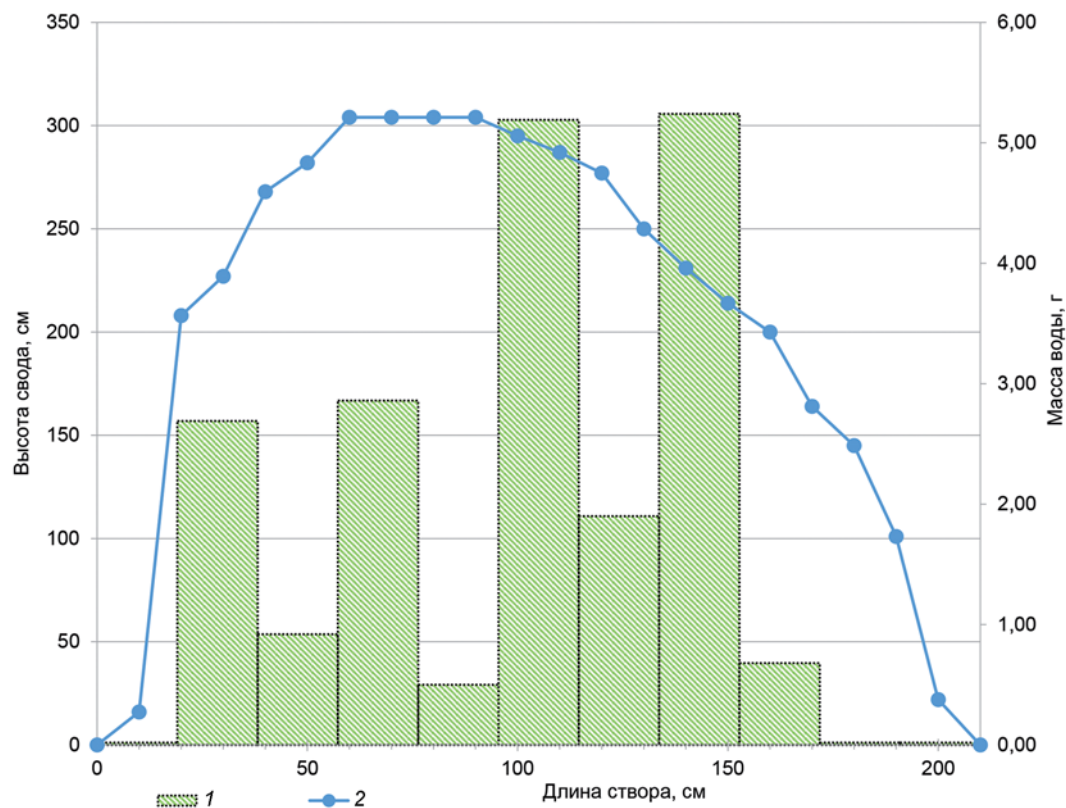


Рис. 3. Количество конденсационной воды в поперечном створе южной галереи Денисовой пещеры.
1 – количество конденсата; 2 – профиль свода.

близительно по 5,2 г – было собрано в емкостях 6 и 8. Емкость 6 располагалась на осевой линии галереи на расстоянии ок. 1 м от коренных стен и собрала 5,19 г воды. Емкость 8 была установлена на расстоянии около 0,6 м от западной стены галереи и собрала 5,24 г воды. В целом при общей ширине створа 2,1 м на тяготеющем к осевой части южной галереи участке шириной 0,85 м в пяти емкостях (4–8) оказалось в сумме 15,69 г воды, или около 79 % всего собранного конденсата (рис. 3).

Как показали наблюдения, количество конденсационной влаги, выпавшей в сравнительно узкой полосе вдоль осевой линии, почти в 4 раза превышает общее количество конденсационной влаги, выпадающей на всей остальной площади галереи, примыкающей к стенам. Неравномерное количество воды в разных емкостях объясняется тем, что падение капель происходит не равномерно по площади свода, а сосредоточено в местах, соответствующих выступам его микрорельефа или перегибам профиля. Независимо от микрорельефа наблюдается очевидная тенденция доминирующего осаждения конденсата на наиболее возвышенных участках свода. В то же время короткий период наблюдения не позволяет исчерпывающим образом определить характер связи между климатическими условиями вне пещеры и внутри нее и оценить суммарное количе-

ство конденсационной воды, поступающей в пещеру за теплый сезон.

Результаты наблюдений позволяют предположить, что микроклиматические условия обитания первобытного человека в Денисовой пещере определялись не только и не столько температурой воздуха, сколько комфортной или некомфортной влажностью, которая зависит от разницы температур внешнего воздуха и коренного скального массива. При прохождении через галерею наружный воздух теряет ок. 50 % содержащейся в нем влаги в пределах верхних 2 м от свода галереи. Поэтому объем поступающей и остающейся в пещере воды определяется преимущественно направлением и интенсивностью воздухообмена у свода полости. Распределение выпадающей конденсационной влаги весьма неравномерно по поперечному профилю южной галереи. Наибольшее количество воды, конденсируясь у свода, выпадает в осевой зоне галереи, а не стекает по стенам. В этой связи степень увлажнения грунта отличается высокой пространственной неравномерностью, обусловленной особенностями криптоклимата и морфологии карстовой полости. Поскольку степень увлажнения отложений является ведущим фактором, определяющим их постседиментационные химические и механические преобразования, полученные результаты позволяют уточнить особенности этих процессов в пещере.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-78-10006, <https://rscf.ru/project/24-78-10006/>.

Список литературы

Дублянский В.Н. Занимательная спелеология. – Челябинск: Урал LTD, 2000. – 253 с.

Лукин В.С. Температурные аномалии в пещерах Предуралья и критический анализ теорий подземного холода // Пещеры. – 1965. – Вып. 5 (6). – С. 164–172.

Шуньков М.В., Агаджанян А.К. К оценке микроклимата Денисовой пещеры // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2007. – Т. XIII. – С. 162–166.

References

Dublyanskii V.N. Zanimatel'naya speleologiya. Chelyabinsk: Ural LTD, 2000. 253 p. (In Russ.).

Lukin V.S. Temperaturnye anomalii v peshcherakh Predural'ya i kriticheskii analiz teorii podzemnogo kholoda. Peshchery, 1965. Iss. 5 (6). P. 164–172. (In Russ.).

Shunkov M.V., Agadzhanian A.K. Towards an assessment of the microclimate of Denisova Cave. In *Problems of Archaeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ., 2007. Vol. XIII. P. 162–166. (In Russ.).

Ульянов В.А. <https://orcid.org/0000-0002-7798-0399>

Деревнина А.С. <https://orcid.org/0000-0003-1434-3875>

Козликин М.Б. <https://orcid.org/0000-0001-5082-3345>

Шуньков М.В. <https://orcid.org/0000-0003-1388-2308>

Дата сдачи рукописи: 04.09.2025 г.