

¹А. С. Гусев, ²Г. Швядас, ³Т. А. Немченко, ⁴В. О. Шадрин, ⁵А. А. Янина

¹*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ*

им. М. В. Ломоносова

²*Вильнюс, Литва*

³*Русское географическое общество, Московское (городское) отделение*

⁴*Спелеоклуб «Оникс», Хабаровск*

⁵*Клуб спелеологов МГУ*

ВОДНЫЙ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМЫ В ДОННОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ СНЕЖНАЯ (ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ, АБХАЗИЯ)

¹A. S. Gusev, ²G. Švedas, ³T. A. Nemchenko, ⁴V. O. Shadrin, ⁵A. A. Yanina

¹*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University*

²*Vilnius, Lietuvos Respublika*

³*Russian Geographical Society, Moscow City Branch*

⁴*Caving Club "Onix", Khabarovsk*

⁵*Moscow University Cavers Club*

WATER AND TEMPERATURE CONDITIONS IN THE BOTTOM PART OF SNEZHNAJA CAVE SYSTEM (WESTERN CAUCASUS, ABKHAZIA)

Summary

The results of the analysis of data on monitoring the level and temperature of water in January 2015 – July 2019 and air temperature in January 2015 – February 2016 in the “old” (Penelope Hall) and “new” (Morozov Lake) parts of the bottom gallery of the Snezhnaya cave system are presented. The average water temperature in the Penelope Hall is $+5,92 \pm 0,13^\circ\text{C}$ and it lies in the range from $+5,32^\circ\text{C}$ to $+6,16^\circ\text{C}$; the average water temperature near the Morozov Lake is $+6,08 \pm 0,21^\circ\text{C}$ with maximal and minimal values of $+5,56^\circ\text{C}$ and $+6,60^\circ\text{C}$. The air temperature in the Penelope Hall ranges from $+5,77$ to $+6,16^\circ\text{C}$ with an average value of $+6,00 \pm 0,10^\circ\text{C}$. The air temperature on Morozov Lake does not change throughout the year, it ranging from $+6,41$ to $+6,53^\circ\text{C}$ with an average value of $+6,47 \pm 0,02^\circ\text{C}$. The maximum height of the water level rise in the Penelope Hall reaches 58–59 m for single floods and 58–60,5 m for long-term floods. In the case of Morozov Lake, the height of water rise in the case of extended floods is 10–15 m higher than for single floods: 61–66 m versus 50–53 m. The maximal levels of water are 71,5 m in Penelope Hall and 81,4 m in Morozov Lake. In the Penelope Hall, the characteristic values of the maximum rate of water rise are 30–38,5 m/h in the case of single floods and 17–30 m/h for extended floods. Near the Morozov Lake, the maximum values are 13,6–14,7 and 9–10,5 m/h, respectively. Water reservoirs in the old and new parts of the Snezhnaya cave system do not communicate with each other. There is no hydrological connection through possible gaps at lower altitudes relative to the Metrostroy Hall between the Throne Hall and the Penelope and X Halls. The results indicate the existence of two separate hydrological and climatic systems with significant differences in the morphology the old and new parts of the cave system.

Введение. Расположенная на Хипстинском массиве Бзыбского хребта пещерная система Снежная по своим морфометрическим параметрам является самой длинной карстовой полостью Кавказа (общая длина ходов 40840 м) и входит в четверку глубочайших пещер мира (амплитуда 1760 м). Шесть известных входов в систему расположены на следующих абсолютных высотах над уровнем моря: Иллюзия (2389 м), Меженного (2015 м), Снежная (1970 м), Банка (1505 м), Хренова Яма (1329 м) и Фантазия (1318 м) [1]. Три нижних входа находятся в зоне леса, верхние входы расположены в луговой зоне.

Объем пещерной системы оценивается в 2,7 млн м³ [2]. Большая часть объема приходится на донную часть полости, где находятся крупнейшие залы системы: Икс (площадь 11000 м², объем 250000 м³), Тронный (площадь 20500 м², объем 410 000 м³), Венский (площадь 6000 м², объем 90 000 м³) и др. [1].

Пещерная система обладает развитой гидрологической сетью, включающей в себя две крупных подземных реки, восемь крупных (расход больше 10 л/с) и 30 мелких притоков [2, 3]. Уникальность полости заключается в наличии двух независимых гидросистем, соединить которые до сих пор не удалось. Пещерная река Снежной (Гужва) изучена на протяжении 6,3 км. Она вытекает из сифона на глубине 720 м (относительно верхнего входа в систему) и на глубине 1740 м уходит под мощный глыбовый завал. С противоположной стороны под тот же завал втекает такая же крупная Новая (Татьянина) река, пройденная на протяжении более 1 км. Нижней точкой системы (-1760 м) является в настоящее время сифон в донной части оз. Морозова, расположенного на Татьяниной реке (рис. 1).

За последние годы была открыта сложная система вертикальных ходов и колодцев в донной части пещеры. В нескольких местах удалось спуститься ниже уровня -1740 м. Под завалом удалось выйти на р. Лебединая (по-видимому, – продолжение реки Гужва) [1, 3].

Меженный расход подземной р. Снежной (Гужва) в донной части оценивается в 150–300 л/с, среднегодовой – около 500 л/с, расход в паводки – более 2000 л/с; средняя скорость течения подземной реки в межень на горизонтальных участках составляет 0,2 м/с [4, 5]. Меженный расход Новой (Татьяниной) реки оценен в 80–300 л/с [3].

Хипстинский массив и, в частности, пещерная система Снежная достаточно хорошо изучены как с точки зрения геологии [2, 6-8], так и с точки зрения гидрологии [3, 9, 10]. Затрагивались и вопросы гидрологического режима в донной части системы [11]. Однако систематических мониторинговых измерений уровня подъема воды, температуры воды и воздуха в нижней части полости ранее не проводилось.

Исходной мотивацией установки датчиков для мониторинга уровня воды, давления и температуры воздуха послужила наша уверенность в том, что анализ собранных данных поможет в планировании во времени будущих экспедиций, обеспечивая их безопасность путем избегания паводков. Первично обработанные данные мониторинга уровня воды и температуры воды и воздуха в пещере Снежная предоставляются под лицензией CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode>) и доступны по ссылке: https://speleo.lt/speleo/snieznaya/snow_cave_data.zip. Распространение исходных данных возможно только вместе с сопроводительным письмом (см. <https://speleo.lt/speleo/snieznaya>).

Места будущей установки датчиков были выбраны Т. Немченко, основываясь на ее опыте и знаниях особенностей пещеры в контексте необходимом для правильной работы датчиков. Выбор мест установки датчиков был также обусловлен желанием проверить несколько гипотез относительно зависимости между уровнями воды в озере им. Морозова, Тронном зале, полусифонах на подходе к Венскому залу, водотоке в Венском зале и др.

В данной работе мы приводим результаты и первичный анализ 4,5-летнего мониторинга уровня и температуры воды и однолетнего мониторинга температуры воздуха в старой (зал Пенелопы) и новой (озеро Морозова) частях донной галереи Снежной.

Проведение эксперимента по мониторингу и обработка данных. *Постановка эксперимента и используемые приборы.* Используемые датчики канадской фирмы Solinst (<https://www.solinst.com>) были предоставлены А. Гудайтисом (А. Gudaitis, cgtktjrke, Aenigma, Литва). Консультации о подготовке датчиков к установке в пещере и аспектах работы с ними провел Б. Паукштис (В. Paukštys, Vandens Harmonija UAB).

Пара датчиков состоит из двух элементов: 1) барологгер измеряет температуру и давление атмосферного воздуха, монтируется в сухой, не заполняемой водой среде. Для сбора данных использовался прибор 3001 Barologger Gold (<https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/operating-instructions/user-guide/1-introduction/1-1-8-barologger-gold.php>); 2) гидрологгер измеряет температуру и давление (уровень) воды, монтируется в обводненной среде. Для сбора данных использовался прибор 3001 Levelogger Gold (<https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/operating-instructions/user-guide/1-introduction/1-1-7-levellogger-gold.php>).

Барологгер – датчик, показания которого используются в качестве поправки на давление атмосферного воздуха. Разница показателей гидро- и барологгера определяет уровень воды в месте установки гидрологгера.

Датчики были установлены во время зимней экспедиции 2014-2015 г.г., под руководством В. Шадрина. Датчики давления были демонтированы Т. Немченко в январе 2016 года. Датчики уровня воды были демонтированы во время зимней экспедиции 2019-2020 г.г. под руководством А. Яниной.

Для обоих барологгеров были выбраны точки, где не было явных признаков затопления – следы ног спелеологов на глине сохранялись от сезона к сезону. Предполагается, что вода заполняет их очень слабым течением.

Первая пара датчиков была установлена в районе зала Пенелопы: барологгер – в середине завала Метростроя на глыбе, а гидрологгер – в русле реки в районе зала Пенелопы, на подходе к началу завала Метростроя, на границе уреза воды, ниже точки «Репер 1320» на 1-1,5 м (рис. 1). Превышение верхнего логгера над нижним составило 50,5 м.

Вторая пара была установлена у оз. Морозова: гидрологгер – непосредственно у озера, барологгер – в Петином меандре на верхнем ярусе, в небольшом зале на 78 м выше гидрологгера (рис. 1).

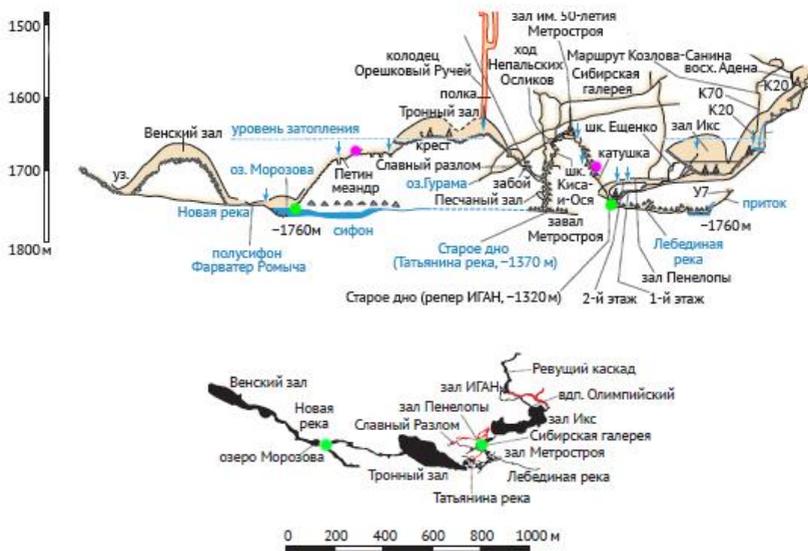


Рис. 1. План и разрез-развертка донной части системы Снежная [1] с указанием мест расположения логгеров. Зеленым цветом отмечены места установки гидрологгеров, фиолетовым – барологгеров (только на разрез-развертке). Топографическая карта разрез-развертки составлена под руководством А. П. Дегтярева. Источник материалов: сайт <http://club13mm.ru>. Более детальные карты мест установки приборов см. на <https://speleo.lt/speleo/snieznaya>

Абсолютные отметки высот местоположений гидрологгеров составили 645 м н.у.м. – для датчика в зале Пенелопы и 635 м н.у.м. – для датчика на озере Морозова.

Места установки гидрологгеров у репера 1320 и на озере Морозова выбраны на двух крупнейших водотоках (реках) пещерной системы. Это самые глубокие свободно доступные места, расположенные в залах с высоким сводом и пригодные для гидрологических наблюдений в донной части пещеры.

Обработка данных мониторинга. На первом этапе для всех четырех логгеров были построены полные ряды данных (уровень h_{exp} и температура воды t_{water} для гидрологгера и температура воздуха t_{air} и уровень компенсации l_{comp} (аналог атмосферного давления) – для барологгера).

Первичный анализ данных показал, что для всех приборов существует некоторое время релаксации: начальные отсчеты температур воды и воздуха имеют нереально большие колебания, достигающие 2°C и более за час. Такие данные были исключены из дальнейшего анализа.

Примерно через год работы оба барологгера стали работать нестабильно, что опять выразилось в больших колебаниях температуры воздуха. Через 9 часов после начала нестабильной работы барологгер, установленный в зале Пенелопы, прекратил запись параметров. Барологгер на озере Морозова продолжил запись, выйдя на нереальные значения t_{air} около $+24^{\circ}\text{C}$. Отсчеты барологгеров после окончания стабильной работы приборов были также исключены из дальнейшего рассмотрения.

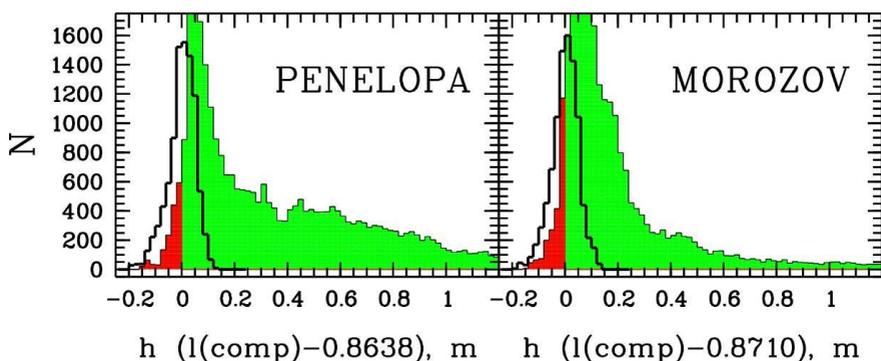


Рис. 2. Гистограммы распределения значений $l_{\text{comp}}-0.8638$ (зал Пенелопы) и $l_{\text{comp}}-0.8710$ для данных из оз. Морозова (черные линии) и скомпенсированных значений h (красный цвет – отрицательные значения, зеленый цвет – значения $h \geq 0$)

Установлено, что в паводки при достижении в зале Пенелопы уровня воды h_{exp} равно $50,5$ м, значение уровня компенсации l_{comp} начинает резко расти так, что $h_{\text{exp}} - l_{\text{comp}} \approx \text{const}$. Очевидно, это связано с затоплением барологгера. Для случаев, когда в зале Пенелопы отсчеты уровня воды h_{exp} превышали $50,5$ м, поправка за уровень компенсации проводилась так же, как и для случаев, когда данные с барологгера отсутствовали (см. ниже).

Оба гидрологгера стабильно отработали 4,5 года. К сожалению, часть данных с гидрологгера, установленного на оз. Морозова, восстановить не удалось (см. данные в табл. 1).

Временные интервалы данных, используемых для дальнейшего анализа, приведены для каждого параметра в табл. 1. В таблице и при дальнейшем анализе используется московское время часового пояса UTC+3. Общий массив данных составил 39714 отсчетов для уровня и температуры воды и 9257 отсчетов для температуры воздуха в зале Пенелопы и 39591 и 9208 отсчетов, соответственно, – на оз. Морозова.

На втором этапе значения уровня воды исправлялись за уровень компенсации барологгера. В случаях, когда значения уровня компенсации были измерены, исправление проводилось по формуле:

$$h = h_{\text{exp}} - h_{\text{comp}} \quad (1)$$

Нами были найдены средние значения l_{comp} для зала Пенелопы ($0,8638 \pm 0,0514$ м) и озера Морозова ($0,8710 \pm 0,0502$ м). Проведенный анализ показал, что величины l_{comp} распределены по нормальному закону (см. черные гистограммы на рис. 2), поэтому их средние значения можно использовать для случаев, когда значения уровня компенсации не были определены:

$$h = h_{\text{exp}} - 0,8638 \quad (2)$$

– для данных в зале Пенелопы и

$$h = h_{\text{exp}} - 0,8710 \quad (3)$$

– для данных на озере Морозова.

Таблица 1

Временные интервалы используемых данных

Зал Пенелопы				Озеро Морозова			
$h_{\text{exp}}(h)$	t_{water}	l_{comp}	t_{air}	$h_{\text{exp}}(h)$	t_{water}	l_{comp}	t_{air}
2015.01.12	23:00	2015.01.12 23:00	2015.01.12 23:00	2015.01.12 23:00	2015.01.12 23:00	2015.01.12 23:00	2015.01.12 23:00
-	-	-	-	-	-	-	-
2019.07.25	16:00	2015.06.26 06:00, 2015.06.26 16:00	2016.02.02 15:00	2015.09.08 09:00, 2015.09.09 03:00	-	-	2016.01.31 14:00
-	-	2015.10.25 08:00, 2015.10.25 19:00	-	2015.09.09 23:00, 2015.09.10 05:00	-	-	-
-	-	2016.02.02 15:00	-	2015.09.13 17:00, 2015.09.15 06:00	-	-	-
-	-	-	-	2018.02.03 17:00, 2018.02.04 16:00	-	-	-
-	-	-	-	2019.01.05 17:00, 2019.01.06 16:00	-	-	-
-	-	-	-	2019.07.24 19:00	-	-	-

Гистограммы распределения значений h для данных в обоих местах измерений представлены на рис. 2. Как мы видим, некоторое количество скомпенсированных значений уровня воды показывают отрицательные значения (красные области на рисунке). Это связано с отклонениями от среднего атмосферного давления при межленном уровне воды ($h \approx 0$ м). Вместе с тем распределения h в отрицательной области повторяют распределения l_{comp} , а минимальные значения $h = -0,1564$ м для зала Пенелопы и $-0,1449$ м для оз. Морозова равны 3σ . Это говорит о корректности использования формул (2) и (3) для компенсации уровня воды.

Анализ результатов. *Сезонные изменения водного и температурного режимов.* Полученные и исправленные ряды данных представлены на рис. 3. Хорошо заметны сезонные особенности водного и температурного режимов в донной части системы. Период зимней межени начинается в конце октября – начале декабря, после окончания крупных летних паводков, и продолжается до второй половины марта. Зимний период характеризуется полным отсутствием крупных паводков (уровень подъема воды в районе озера Морозова не превышает 12 м, а в зале Пенелопы – 5 м) и малым количеством мелких,

относительно постоянной высокой температурой воды и воздуха. При этом между температурой воды и воздуха в зале Пенелопы наблюдается антикорреляция (рис. 3).

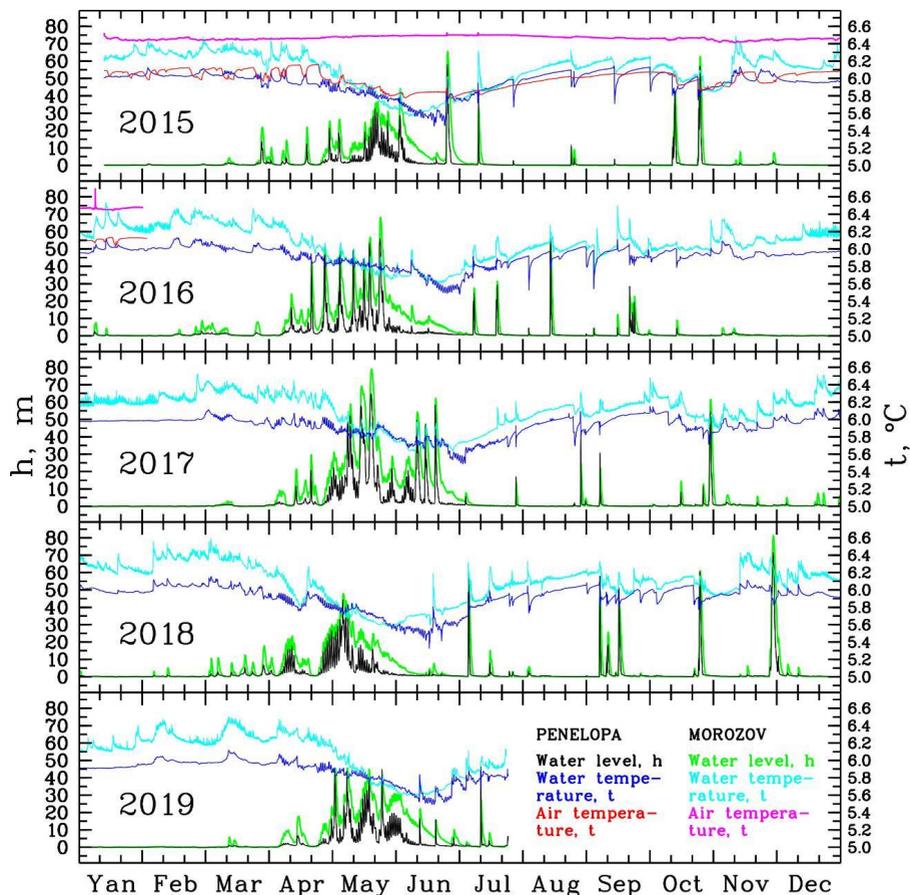


Рис. 3. Профили уровня подъема воды (черные и зеленые кривые), температуры воды (синие и голубые) и воздуха (красные и розовые) в зале Пенелопы (черные, синие, красные) и на озере Морозова (зеленые, голубые и розовые)

В середине марта – начале апреля начинается период весеннего паводка. Он продолжается 1,5-2,5 месяца до конца мая – третьей декады июня. Температура воды в этот период начинает падать, минимальных значений достигает и температура воздуха (в зале Пенелопы). Отметим, что профили уровня подъема воды в этот период отличаются год от года. Продолжительность и мощность паводков различна (ср. 2015 и 2018 г. с 2016 и 2017 г. на рис. 3). При этом, в случае относительно небольших весенних паводков (2015, 2018, 2019 г.) наблюдаются суточные колебания уровня воды (рис. 4). При этом подъем воды начинается в 13-14 часов дня в зале Пенелопы и в 17-18 часов – на озере Морозова и достигает максимальных значений в 21-22 часа вечера в зале Пенелопы и в 24-2 часа ночи – на озере Морозова. Отметим, что восход Солнца в начале мая в районе Снежной происходит в 06:07-06:14. Суточная амплитуда при этом может достигать 20 м.

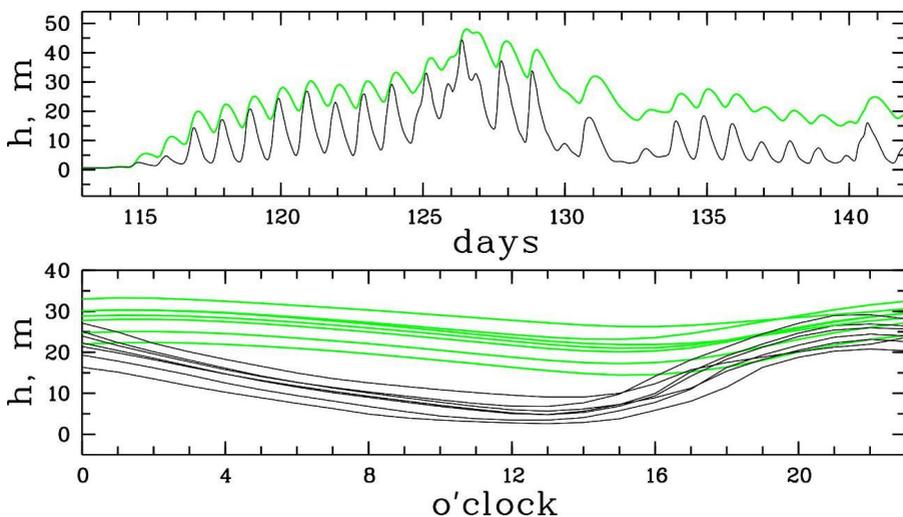


Рис. 4. Профили уровня подъема воды в зале Пенелопы (черные кривые) и на озере Морозова (зеленые кривые) в период между 24 апреля и 22 мая 2018 г. (верхний график) и суточные колебания в период между 29 апреля и 5 мая 2018 г. (нижний график). По оси абсцисс на верхнем графике отмечено полное число дней, прошедших с начала года (полночь 1 января соответствует началу нулевого дня, полночь 24 апреля – началу 113-го дня и т. д.)

Летне-осенний период характерен редкими, но мощными паводками. Высота подъема воды может достигать 80 м на оз. Морозова и 70 м – в зале Пенелопы. Температура воды и влажного воздуха (в зале Пенелопы) постепенно повышается (рис. 3).

Связь водного и температурного режимов в донной части пещеры с метеорологическими данными на поверхности. Для изучения влияния погодных условий на поверхность на водный и температурный режим в пещере мы использовали архивные данные наблюдений наземных метеостанций. К сожалению, на территории Абхазии отсутствуют метеостанции в горах, а для метеостанций на побережье (Сухум, Гудаута, Гагра) архивные данные недоступны. Ближайшими к Хипстинскому массиву точками с доступными метеоданными являются аэропорт Сочи (пос. Веселое) и гор. Зугдиди (Мегрелия, Грузия), причем для последней отсутствуют данные по количеству осадков. В данной работе мы использовали данные метеонаблюдений (температура воздуха и количество осадков) в аэропорту Сочи за тот же период 2015-19 гг., взятые с сайта gr5.ru.

Скважность архивных данных наблюдений температуры составляет 3 часа (полночь, 03:00, 06:00 и т. д.). Данные по количеству осадков учитываются за 12-часовой интервал (с 06:00 до 18:00 и с 18:00 до 06:00 следующего дня). Сравнение данных наземных метеонаблюдений с данными логтеров на дне системы Снежная показано на рис. 5.

Отметим, что температура воздуха понижается с высотой над уровнем моря примерно на 6°С на 1 км. Средняя температура воздуха на уровне входа в Снежную (2000 м н.у.м.) будет поэтому на 12°С ниже, чем на побережье, а на уровне входа в Банку – на 9°С ниже.

Сравнение наземных и подземных данных показывает, что период зимней межени начинается при переходе среднесуточных осенних температур в г. Сочи отметки +10 +12°С. Зимние паводки возможны либо при одновременном (не менее недели) повышении температуры в г. Сочи до отметок +18 +20°С днем и +10 +12°С ночью (продолжительность таких паводков может также длиться неделю и более), либо при мощных осадках, если

среднесуточная температура воздуха на уровне моря к моменту начала осадков $T > +10$ $+12^{\circ}\text{C}$. При более низких температурах в г. Сочи никакие мощные осадки не вызывают подъема воды в пещере (рис. 5).

Отметим при этом, что температура воды в пещере более чувствительна к осадкам на поверхности. Резкое повышение температуры воды на $0,1-0,3^{\circ}\text{C}$ является индикатором осадков, хотя может и не вызвать заметного паводка.

Весенние паводки начинаются при повышении среднесуточной температуры в г. Сочи выше $+12^{\circ}\text{C}$. Дожди на поверхности в это время вызывают в пещере короткие (несколько дней) мощные паводки, похожие на летние. При отсутствии осадков колебания уровня подъема воды более плавные, имеют суточный режим и меньшую амплитуду. Первый тип паводков был характерен для 2016, 2017 и, отчасти, 2019 гг. Второй тип весенних паводков наблюдался в 2015, 2018 гг. и после 10 мая в 2019 году (рис. 5).

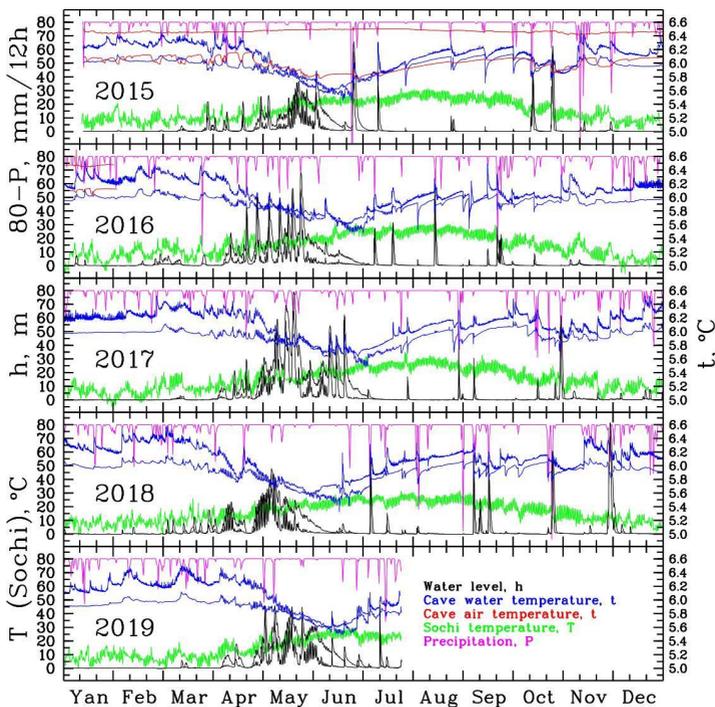


Рис. 5. Профили температуры воздуха (зеленые кривые) и количества осадков за 12 часов (розовые) в аэропорту г. Сочи в сравнении с профилями уровня подъема воды (черные), температуры воды (синие) и воздуха (красные) в донной части пещеры

Летний сезон характерен редкими, но мощными относительно короткими паводками, связанными с осадками на поверхности. Уровень подъема воды при летних паводках, как правило, превосходит максимальные уровни подъема во время весеннего половодья.

Безусловный практический интерес вызывает связь между уровнем подъема воды в пещере и количеством выпавших осадков по данным наземных метеостанций в летний период. Могут ли данные о количестве выпавших осадков в Сочи дать нам указание на высоту подъема воды в пещере? Мы построили зависимость между этими величинами на рис. 6. Поскольку данные по количеству осадков даются на 12 часов, мы усреднили отчеты логгеров за этот же период (12 отсчетов). При этом мы сместили нуль-пункты начала

отсчетов в пещере на 6 часов вперед относительно поверхности: уровень воды в пещере за период с полуночи до полудня сравнивался с количеством осадков, выпавших с 18 часов предыдущих суток до 6 часов утра, а с полудня до полуночи – с 6 утра до 6 вечера.

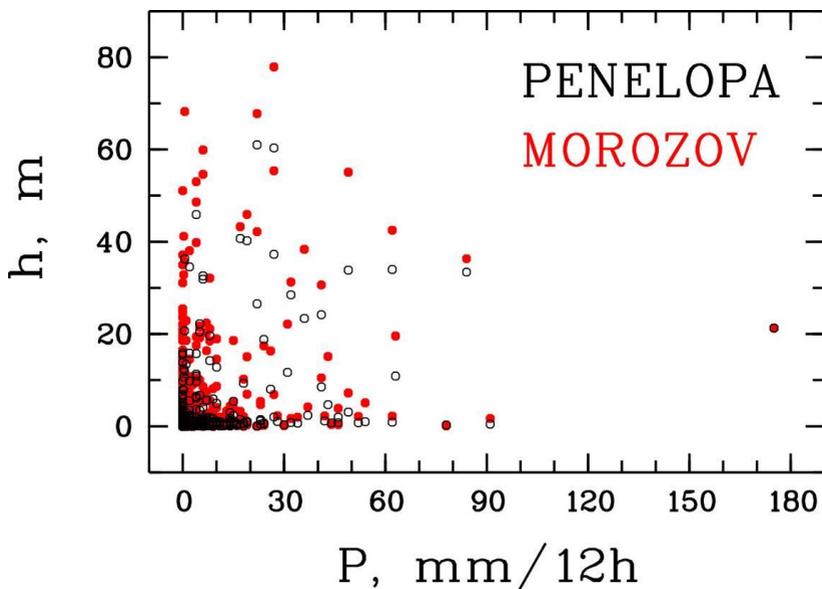


Рис. 6. Зависимость между количеством осадков в аэропорту Сочи и уровнем воды в зале Пенелопы (черные кружки) и на озере Морозова (красные кружки)

Как видно из рис. 6, корреляция между количеством осадков в г. Сочи и уровнем подъема воды в донной части пещерной системы в летнее время крайне слабая. Например, мощнейший ливень в г. Сочи 25 июня 2015 г., когда за 12 часов с 06:00 до 18:00 выпало 175 мм осадков, а за сутки с 18:00 24 июня до 18:00 25 июня – 212 мм, вызвал мощный паводок в пещере (максимальный подъем воды составил 58,3 м в зале Пенелопы и 65,8 м на озере Морозова), однако этот паводок начался лишь после 22:00 25 июня, а пик его пришелся на полдень 26 июня. Ливень 11 ноября 2015 г. (91 мм осадков между 06:00 и 18:00) вызвал лишь незначительный подъем воды до 3 м, причем лишь на озере Морозова (см. рис. 2, 5, 6). 78 мм осадков, выпавших в Сочи в ночь на 1 сентября 2018 г., никак не отразились на уровне воды в донной части Снежной – здесь наблюдалась глубокая межень, хотя и вызвали небольшое (порядка 0,1°C) понижение температуры воды в зале Пенелопы (рис. 5).

Обратная ситуация наблюдалась, например, 11 июля 2015 г., когда 40-метровый подъем воды в пещере соответствовал весьма умеренному дождю (10 мм осадков за 12 часов и 18 мм суммарно за полтора суток) в г. Сочи. 19 июля 2016 г., когда в Снежной наблюдался 30-метровый паводок, в г. Сочи выпало лишь 0,5 мм осадков. Мощные паводки 14 августа 2016 г. (подъем воды до 59 м) и 21 июня 2017 г. (подъем воды до 62 м) соответствовали сильным, но рядовым летним сочинским ливням (суммарно 27 и 23 мм осадков, соответственно). Во время уникального мощнейшего, продолжавшего несколько суток паводка 28 ноября – 3 декабря 2018 г., когда вода поднималась выше 71 м в зале Пенелопы и выше 81 м на озере Морозова, в г. Сочи выпало двумя порциями лишь 58 (за трое суток) и 22 мм (за полтора суток) осадков.

Отметим антикорреляцию между температурой воздуха на поверхности и температурой воды и воздуха в донной части пещеры (рис. 5, 7). Максимальные значения температуры воды и воздуха в пещере фиксируются зимой, а минимальные – в июне, в конце

весенних паводков. При этом более четкая обратная зависимость $t_{\text{water}} - T$ на поверхности наблюдается для температуры воды на озере Морозова. На рис. 7 хорошо заметна разница между t_{water} и T в начале (июнь) и конце лета (август-сентябрь), когда при одинаковых температурах воздуха на поверхности (+20...+30°C) температура воды в пещере отличается на 0,2-0,4°C.

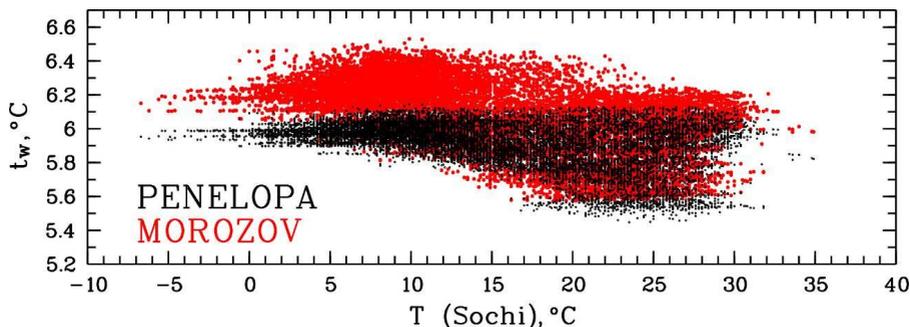


Рис. 7. Температура воздуха в аэропорту г. Сочи и температурой воды в зале Пенелопы (черные точки) и на оз. Морозова (красные точки)

Температуры воздуха и воды в донной части системы Снежная. Как уже было отмечено выше, минимальные значения температуры воздуха и воды в донной части системы фиксируются в июне, к моменту окончания весеннего паводка (рис. 3). Как температуры воды, так и воздуха меняются очень плавно, исключая периоды весенних и летне-осенних паводков (рис. 3, 8). При этом часовые изменения температуры воды на озере Морозова систематически больше, чем в зале Пенелопы, и достигают значений $\pm 0,1-0,15^\circ\text{C}$ в период зимней межени (рис. 8).

Лишь в период весенних паводков, когда в зале Пенелопы температура воды колеблется с суточным периодом и амплитудой до $\pm 0,02-0,03^\circ\text{C}$, на озере Морозова наблюдаются такие же и меньшие амплитуды колебаний t_{water} (рис. 8). Максимальные скачки температуры воды фиксируются во время мощных летних паводков, когда часовые изменения температуры Δt_{water} достигают значений $-0,30 - +0,26^\circ\text{C}/\text{час}$ в зале Пенелопы и $-0,27 - +0,49^\circ\text{C}/\text{час}$ – на оз. Морозова (рис. 8). При этом, если во время зимних и весенних паводков температура воды повышается, то во время летних и осенних паводков наблюдаются как положительные, так и отрицательные скачки температур.

Среднее значение t_{water} в зале Пенелопы составляет $+5,92 \pm 0,13^\circ\text{C}$ и лежит в диапазоне от $+5,32^\circ\text{C}$ до $+6,16^\circ\text{C}$, а на оз. Морозова – $+6,08 \pm 0,21^\circ\text{C}$ с минимальным и максимальным значениями $+5,56^\circ\text{C}$ и $+6,60^\circ\text{C}$, соответственно. Средние, медианные, минимальные и максимальные значения температуры по месяцам представлены в табл. 2.

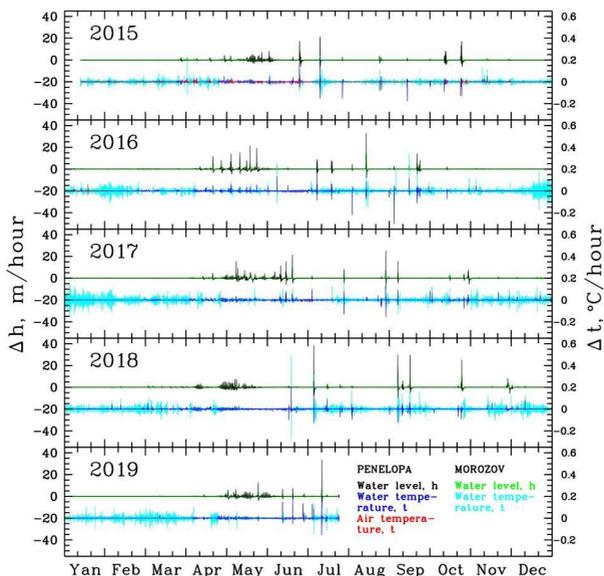


Рис. 8. Профили изменения уровня подъема воды (черные и зеленые кривые), температуры воды (синие и голубые) и воздуха (красные) в зале Пенелопы (черные, синие, красные) и на оз. Морозова (зеленые и голубые)

Таблица 2

Температуры воды (в °С) в донной части системы Снежная

Месяц	Зал Пенелопы				Озеро Морозова			
	средняя	мед.	мин.	макс.	средняя	мед.	мин.	макс.
январь	5,98±0,04	5,98	5,905	6,117	6,22±0,07	6,22	6,091	6,536
февраль	6,02±0,04	6,02	5,950	6,131	6,30±0,08	6,29	6,168	6,559
март	6,01±0,05	6,01	5,890	6,155	6,32±0,07	6,32	6,076	6,597
апрель	5,93±0,06	5,94	5,754	6,099	6,18±0,13	6,22	5,805	6,474
май	5,81±0,07	5,82	5,547	5,979	5,84±0,14	5,84	5,568	6,244
июнь	5,64±0,09	5,62	5,324	5,875	5,69±0,08	5,69	5,562	6,193
июль	5,80±0,10	5,81	5,477	5,999	5,91±0,10	5,90	5,704	6,317
август	5,97±0,07	5,99	5,521	6,100	6,10±0,06	6,11	5,955	6,335
сентябрь	5,99±0,09	5,99	5,539	6,147	6,11±0,10	6,12	5,722	6,496
октябрь	5,95±0,08	5,95	5,709	6,153	6,07±0,10	6,05	5,843	6,483
ноябрь	5,96±0,07	5,95	5,822	6,136	6,11±0,14	6,09	5,845	6,488
декабрь	5,97±0,04	5,96	5,892	6,128	6,18±0,08	6,16	5,998	6,519
за год	5,92±0,13	5,95	5,324	6,155	6,08±0,21	6,13	5,562	6,597

Температура воздуха в донной части системы меняется гораздо слабее. В зале Пенелопы t_{air} лежит в пределах от +5,77 до +6,16°С (см. табл. 3) со средним значением

+6,00±0,10°C, а часовые изменения Δt_{air} лишь во время паводков могут достигать значений - 0,13...+0,06°C/час. Температура воздуха на оз. Морозова на 0,3-0,7°C выше и практически не меняется в течении года, колеблясь в пределах от +6,41 до +6,53°C (небольшой пик до +6,70°C в 16 часов 8 января 2016 г. связан, по-видимому, с антропогенным воздействием) со средним значением +6,47±0,02°C. Лишь во время летних паводков колебания температуры могут достигать значений 0,03°C/час (рис. 3, 8).

Между значениями и характером сезонных изменений как температуры воды, так и воздуха в зале Пенелопы и на оз. Морозова наблюдаются значительные отличия. Рассмотрим эти корреляции более подробно.

В период зимней межени температуры воды и воздуха в зале Пенелопы близки друг другу, причем во время зимних паводков при росте температуры воды температура воздуха – падает (рис. 3, 9). Температура воздуха на озере Морозова на 0,1-0,35°C выше температуры воды и лишь во время паводков они могут сравниться (рис. 3, 9).

Весной температура воздуха в зале Пенелопы примерно на 0,1°C выше температуры воды. Как t_{water} , так и t_{air} одинаково понижаются со временем и лишь в конце периода весеннего паводка температура воды продолжает понижаться при постоянной температуре воздуха так, что разница $t_{\text{water}}-t_{\text{air}}$ достигает значений -0,4°C (рис. 9). За этот период разница $t_{\text{water}}-t_{\text{air}}$ на озере Морозова меняется от -0,25 до -0,95°C, при этом температура воздуха слегка повышается к концу паводка (рис. 9).

Таблица 3

Температуры воздуха (в °C) в донной части системы Снежная

Месяц	Зал Пенелопы				Озеро Морозова			
	средняя	мед.	мин.	макс.	средняя	мед.	мин.	макс.
январь	6,09±0,03	6,09	6,003	6,136	6,46±0,01	6,46	6,430	6,524
февраль	6,08±0,04	6,10	5,985	6,125	6,45±0,01	6,45	6,435	6,476
март	6,07±0,05	6,10	5,967	6,126	6,45±0,01	6,45	6,440	6,467
апрель	6,09±0,06	6,11	5,982	6,161	6,46±0,01	6,46	6,452	6,480
май	5,91±0,06	5,94	5,797	6,043	6,49±0,01	6,49	6,471	6,499
июнь	5,82±0,02	5,83	5,772	5,903	6,50±0,00	6,50	6,487	6,531
июль	5,87±0,04	5,86	5,800	5,935	6,50±0,00	6,50	6,493	6,531
август	5,99±0,03	6,00	5,933	6,025	6,48±0,01	6,48	6,467	6,496
сентябрь	6,05±0,02	6,05	6,014	6,077	6,46±0,01	6,46	6,452	6,478
октябрь	5,98±0,08	5,98	5,860	6,077	6,46±0,01	6,46	6,435	6,474
ноябрь	5,98±0,06	5,95	5,876	6,084	6,43±0,01	6,43	6,412	6,459
декабрь	6,06±0,02	6,07	5,976	6,089	6,45±0,01	6,45	6,435	6,464
за год	6,00±0,10	6,03	5,772	6,161	6,47±0,02	6,46	6,412	6,531

В летне-осенний период температура воздуха в зале Пенелопы быстро сравнивается с температурой воды и даже становится на 0,05-0,1°C ниже. Во время летних паводков из-за падения температуры воды разница $t_{\text{water}}-t_{\text{air}}$ кратковременно может достигать -0,4°C. На оз. Морозова разница $t_{\text{water}}-t_{\text{air}}$ систематически уменьшается к осени от -0,8 до -0,5°C. Как и во время зимних паводков, во время летних температура воды здесь может сравниваться с температурой воздуха (рис. 3, 9).

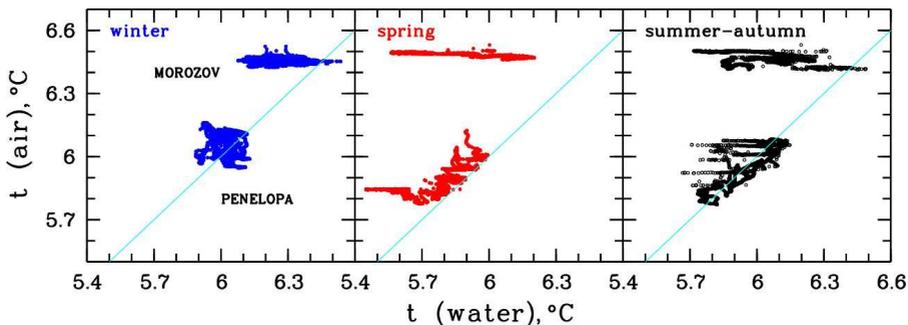


Рис. 9. Зависимость между температурой воды и воздуха в зале Пенелопы и на озере Морозова в зимний период (15 ноября – 24 апреля; левый график), во время весенних паводков (24 апреля – 26 июня; центральный график) и летом-осенью (26 июня – 15 ноября; правый график). Голубые прямые – линии одинаковой температуры

Абсолютные значения и сезонные изменения температуры воды в зале Пенелопы ($t_{\text{water}}(P)$) и на оз. Морозова ($t_{\text{water}}(M)$) так же заметно отличаются друг от друга. В зимний период и на начальной стадии весенних паводков водные потоки в районе озера Морозова на $0,15-0,35^\circ\text{C}$ теплее, чем в зале Пенелопы (рис. 10). Во время максимума весенних паводков разница температур $t_{\text{water}}(M)-t_{\text{water}}(P)$ быстро уменьшается за апрель-май до 0 и даже до $-0,1^\circ\text{C}$, после чего начинает сначала резко (в июне – месяце окончания весеннего паводка), а потом – плавно возрастать в течение второй половины года. При этом, в периоды летней межени разница $t_{\text{water}}(M)-t_{\text{water}}(P)=+0,1\pm 0,1^\circ\text{C}$, а во время паводков возрастает до $+0,5\dots+0,55^\circ\text{C}$ (рис. 10).

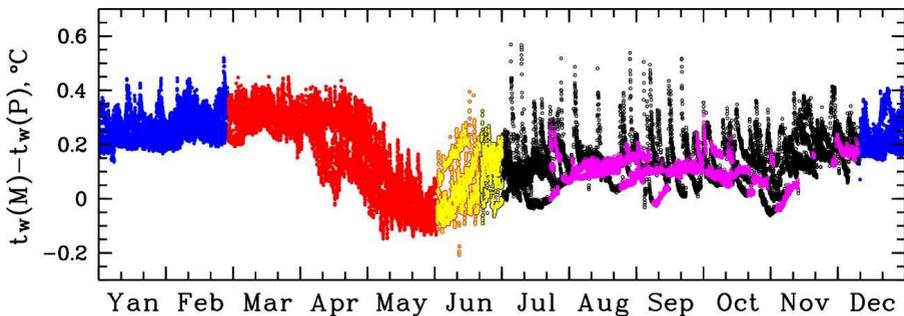


Рис. 10. Температура воды на оз. Морозова и в зале Пенелопы в течение года. Синие точки – период с 9 декабря по 27 февраля, красные – с 27 февраля по 1 июня, желтые на красном фоне – с 1 по 22 июня, желтые на черном фоне – с 22 июня по 2 июля, черные – со 2 июля по 9 декабря. Розовые – период летней межени (уровень воды менее 15 см как в зале Пенелопы, так и на оз. Морозова) между 2 июля и 9 декабря

Данные измерений показывают, что, за исключением периода второй половины весеннего паводка, температура воды на озере Морозова выше, а диапазон ее изменений больше, чем в зале Пенелопы. В зимний период связь между $t_{\text{water}}(M)$ и $t_{\text{water}}(P)$ хорошо описывается линейной зависимостью

$$t_{\text{water}}(M) = (2,10 \pm 0,01) t_{\text{water}}(P) - (6,34 \pm 0,07) \quad (4)$$

(рис. 11).

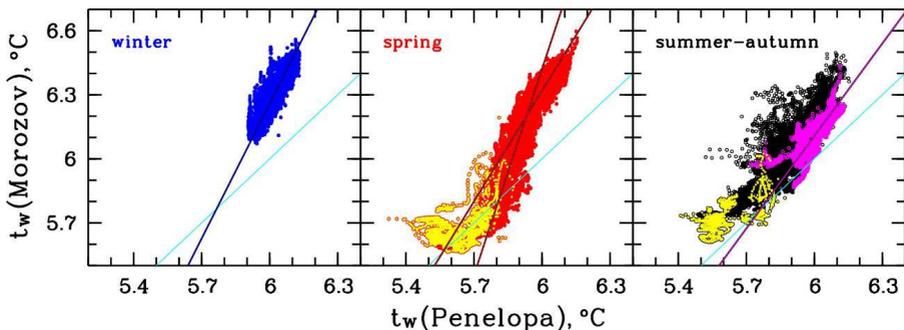


Рис. 11. Температура воды в зале Пенелопы и на оз. Морозова в разные сезоны. Цвета точек – соответствуют цветам на рис. 10. Черно-синяя, черно-красные и черно-розовая прямые – графики уравнений (4)-(7), соответственно. Голубые прямые – линии одинаковой температуры

Зависимость в весенний период показывает более сложный характер. Если в начале весенних паводков она примерно соответствует зимней, то на пике половодья носит нелинейный характер, а на исходе паводка корреляция между $t_{\text{water}}(\text{M})$ и $t_{\text{water}}(\text{P})$ отсутствует: при изменении $t_{\text{water}}(\text{P})$ в широких пределах $t_{\text{water}}(\text{M})$ остается постоянной (рис. 11). В целом зависимость между температурой воды в зале Пенелопы и на оз. Морозова весной, исключая самый конец паводка (июнь), можно представить близкой к зимней линейной зависимостью

$$t_{\text{water}}(\text{M}) = (1,73 \pm 0,01)t_{\text{water}}(\text{P}) - (4,06 \pm 0,05) \quad (5)$$

в начале периода половодья и более крутой зависимостью

$$t_{\text{water}}(\text{M}) = (3,22 \pm 0,01)t_{\text{water}}(\text{P}) - (12,90 \pm 0,07) \quad (6)$$

– во время максимума весенних паводков (рис. 11).

В летне-осенний сезон наблюдается более слабая корреляция между $t_{\text{water}}(\text{M})$ и $t_{\text{water}}(\text{P})$. Однако, во время глубокой межени, когда уровень воды в зале Пенелопы и на озере Морозова не превышает 0,15 м (обозначено розовым цветом на рис. 10 и 11), зависимость между $t_{\text{water}}(\text{M})$ и $t_{\text{water}}(\text{P})$ можно описать пологой линейной функцией

$$t_{\text{water}}(\text{M}) = (1,45 \pm 0,02)t_{\text{water}}(\text{P}) - (2,59 \pm 0,07). \quad (7)$$

Летние паводки в донной части пещерной системы. Для анализа режима паводков в летне-осенний период, мы выбрали 17 крупнейших, при которых максимальный уровень подъема воды и в зале Пенелопы, и на озере Морозова превысил 20 м. Параметры этих паводков даны в табл. 4, а их временные профили уровня h и скорости Δh подъема воды и градиента температуры воды Δt_{water} показаны для зала Пенелопы на рис. 12, а для озера Морозова – на рис. 13. Отметим, что временные нуль-пункты на рис. 12 и 13 совмещены.

Отметим, что гидрологгер в зале Пенелопы располагался примерно на 10 м выше датчика на оз. Морозова.

Как видно из рисунков, большинство крупных летних паводков в пещере не являются одиночными, а имеют два, три и, изредка, более максимумов. Исключая уникальный по мощности паводок 28 ноября – 3 декабря 2018 г., максимальная высота подъема уровня воды в зале Пенелопы достигает 58-59 м для одиночных паводков и 58-60,5 м – для протяженных паводков с несколькими максимумами (рис. 12, табл. 4). На оз. Морозова высота подъема воды в случае протяженных паводков на 10-15 м больше, чем при одиночных: 61-66 м против 50-53 м (рис. 13, табл. 4). В случае паводка 28 ноября – 3 декабря 2018 г. максимальные уровни подъема воды составили 71,5 м в зале Пенелопы и 81,4 м – на оз. Морозова.

Скорости подъема воды в пещере выше в случае одиночных паводков, а в зале Пенелопы – выше, чем на оз. Морозова (рис. 12, 13). В зале Пенелопы характерные значения максимальной скорости подъема воды Δh составляют 30-38,5 м/час в случае одиночных и 17-

30 м/час при протяженных паводках, в то время как на оз. Морозова максимальные Δh равны 13,6-14,7 и 9-10,5 м/час, соответственно (табл. 4). Во время крупнейшего паводка 28 ноября – 3 декабря 2018 г. скорость подъема воды в пещере была незначительной, не превышая 8,4 м/час. Скорости спада воды не превышают 10 м/час в зале Пенелопы и нескольких метров в час – на озере Морозова.

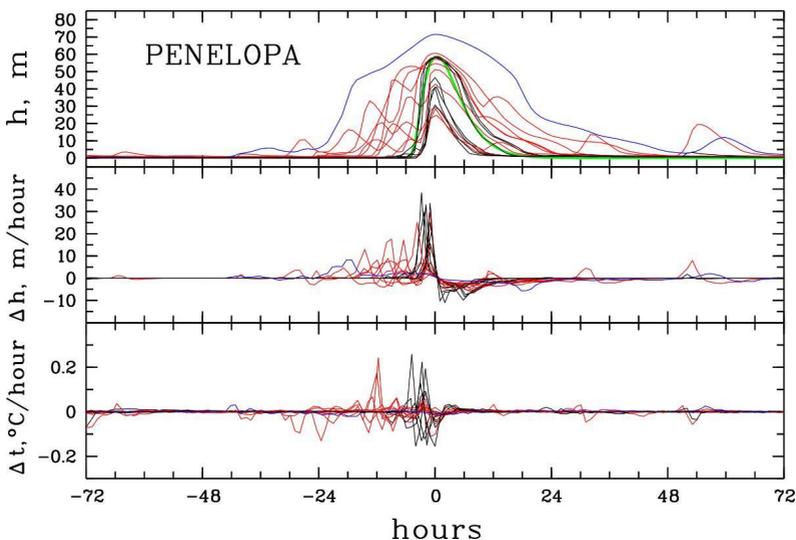


Рис. 12. Профили уровней h (верхний график) и скоростей Δh подъема воды (средний график), градиентов температуры воды Δt_{water} (нижний график) во время крупнейших паводков в зале Пенелопы. Временные нуль-пункты (0 часов) соответствуют максимальному уровню h . Черным цветом обозначены профили одиночных паводков, красным – паводков с несколькими максимумами подъема воды, синим – крупнейший паводок 28 ноября – 3 декабря 2018 г. Жирная зеленая кривая – теоретическая модель профиля паводка согласно уравнению (8)

Максимальные скорости подъема воды достигаются во время одиночных паводков за 1-3 часа до максимума подъема воды в зале Пенелопы и за 4-5 часов – на оз. Морозова (рис. 12, 13). В случае протяженных паводков максимальные скорости подъема воды фиксируются во время первой волны паводка, даже если она не является самой мощной.

Резкие изменения температуры воды до $0,2^\circ\text{C}/\text{час}$ (как положительные, так и отрицательные) так же происходят во время максимума скорости подъема воды в первую волну паводка, а иногда – даже в начале первой волны. При этом, в зале Пенелопы после прохождения максимума паводка t_{water} остается постоянной, а на озере Морозова – испытывает в течение нескольких суток значительные колебания с амплитудой до $0,1-0,15^\circ\text{C}/\text{час}$ (рис. 12, 13).

Важным различием паводкового режима в зале Пенелопы и на оз. Морозова является более плавный характер течения паводка в последнем. Паводки начинаются примерно в одно время, однако достигают максимума на озере Морозова через 3-4 часа после максимального подъема воды в зале Пенелопы (см. табл. 4). Между началом паводка и максимальным уровнем подъема воды в зале Пенелопы проходит 3-6 часов, на оз. Морозова – 6-9 часов. Продолжительность времени спада воды после максимума последней волны паводка не превышает 18 часов в зале Пенелопы и достигает 1,5 суток и более на озере Морозова (рис. 12, 13, табл. 4). Примерно такую же задержку мы наблюдаем и в случае весенних паводков (см. рис. 4).

Профили паводков в зале Пенелопы можно достаточно хорошо описать используя Γ -распределение в виде $h(\tau) \sim \tau^\alpha e^{-\beta\tau}$. Для примера на рис. 12 показан модельный профиль паводка с параметрами

$$h(\tau) = 12,9\tau^{2,15}e^{-0,39\tau}, \quad (8)$$

где $\tau = t+5,18$ часа. Некоторые отклонения модельного профиля от реальных, особенно заметные на $h < 15$ м и $h > 50$ м, вызваны, по-видимому, значительными изменениями площади горизонтальных сечений в районе зала Пенелопы (см. рис. 1).

Профили подъема воды во время паводка на озере Морозова лучше описываются Γ -распределением, однако, спад воды происходит по линейному закону и плохо описывается экспоненциальной функцией. В качестве примера на рис. 13 показан профиль вида

$$h(\tau) = 6,9\tau^{1,84}e^{-0,23\tau}, \quad (9)$$

где $\tau = t+4,2$ часа.

Таблица 4

Параметры 17 крупнейших летних паводков

Дата, время	Вид (О/П)	Зал Пенелопы				Δt	Озеро Морозова			
		t_1	t_2	h_{\max}	Δh_{\max}		t_1	t_2	h_{\max}	Δh_{\max}
2015.06.26 10:00	П	12	40	58,32	17,59	4	17	108	65,79	8,94
2015.07.10 09:00	О	4	10	41,23	21,30	3	7	34	33,14	8,45
2015.10.13 14:00	П	12	16	42,74	8,43	4	33	40	43,19	3,85
2015.10.25 14:00	П	18	23	57,10	17,16	3	22	45	62,76	5,83
2016.07.08 20:00	П	12	8	24,76	8,92	2	13	30	27,68	4,03
2016.07.19 22:00	П	14	9	29,46	8,16	2	16	29	31,79	3,59
2016.08.14 13:00	О	6	18	58,85	33,11	4	8	35	52,46	14,23
2016.09.21 14:00	П	3	10	28,59	14,25	3	6	87	23,22	6,16
2017.08.29 11:00	О	3	7	41,12	25,23	3	6	20	24,92	7,54
2017.09.07 16:00	О	3	8	30,71	15,74	4	7	20	22,25	5,08
2017.10.30 15:00	П	16	24	54,70	7,64	4	23	45	61,79	5,37
2018.07.06 16:00	О	5	18	58,05	38,48	4	9	38	53,10	13,65
2018.09.07 13:00	О	4	14	58,02	29,90	4	7	32	50,13	14,68
2018.09.16 18:00	П	8	22	51,19	29,56	6	13	42	41,28	7,28
2018.10.25 13:00	П	7	28	60,53	25,23	5	20	48	61,22	10,55
2018.11.29 15:00	П	28	47	71,46	8,36	4	43	92	81,43	4,23
2019.07.12 14:00	О	3	9	46,59	33,76	3	7	34	27,78	6,88

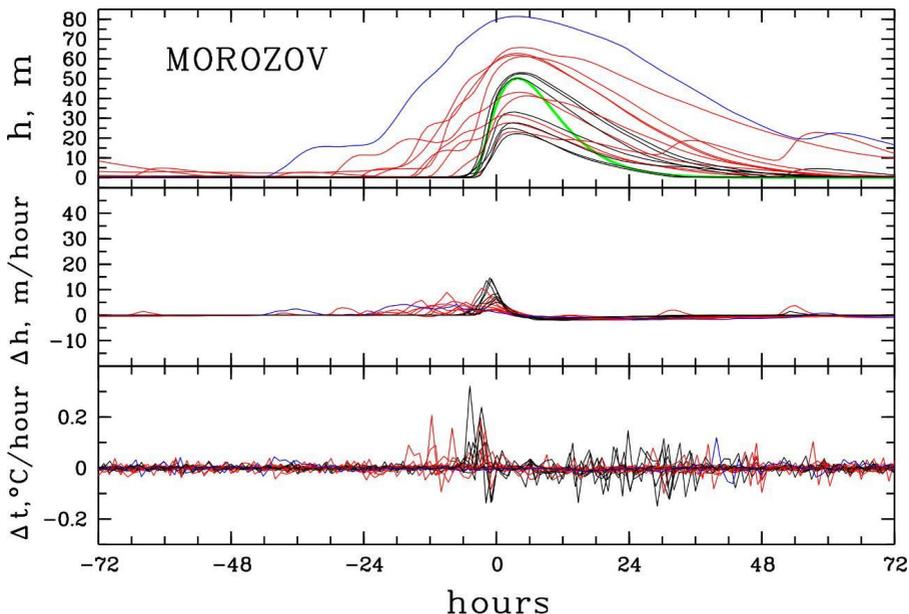


Рис. 13. Профили уровней h (верхний график) и скоростей Δh подъема воды (средний график), градиентов температуры воды Δt_{water} (нижний график) во время крупнейших паводков на оз. Морозова. Временные нуль-пункты (0 часов) соответствуют максимальному уровню h в зале Пенелопы. Жирная зеленая кривая – теоретическая модель профиля паводка согласно уравнению (9)

Динамику изменений уровня подъема воды в зале Пенелопы и на оз. Морозова хорошо иллюстрирует рис. 14. Во время летних паводков уровень воды повышается и достигает максимума гораздо быстрее в зале Пенелопы (красные точки на рисунке). Затем наступает период, когда вода в зале Пенелопы начинает спадать, а на озере Морозова продолжает повышаться (черные точки). После достижения максимального подъема на озере Морозова вода здесь спадает медленнее, чем в зале Пенелопы (зеленые точки). Во время весеннего половодья разница между скоростями подъема-спуска воды в зале Пенелопы и на озере Морозова заметно меньше, чем во время летних паводков, однако, качественно картина остается такой же.

Равенство абсолютных уровней воды (относительно уровня моря, см. желтую прямую на рис. 14) достигается в зале Пенелопы и на озере Морозова не одновременно, а, за редкими исключениями, в те моменты, когда вода в зале Пенелопы начинает спадать, а на озере Морозова – продолжает подниматься.

В табл. 4 представлены данные о крупнейших летних паводках: дата и время максимума подъема воды в зале Пенелопы (колонка 1), характеристика паводка (одиночный (O) или протяженный с несколькими максимумами (П); колонка 2), продолжительность паводка до максимума t_1 (колонка 3) и после максимума t_2 (колонка 4) в часах в зале Пенелопы, максимальный уровень подъема воды h_{max} в метрах (колонка 5) в зале Пенелопы, максимальная скорость подъема воды Δh_{max} в метрах в час (колонка 6) в зале Пенелопы, разница Δt в часах между максимумами паводка в зале Пенелопы и на озере Морозова (колонка 7). Колонки 8-11 повторяют колонки 3-6 для данных на озере Морозова. Значения t_1 и t_2 в колонках 7 и 8 отсчитываются от максимума паводка на озере Морозова. Продолжительность паводка t_1+t_2 соответствует времени, прошедшему между последним

измерением, когда уровень подъема воды еще не превысил отметку 5 м и первым измерением, когда уровень воды опустился ниже 5 метров.

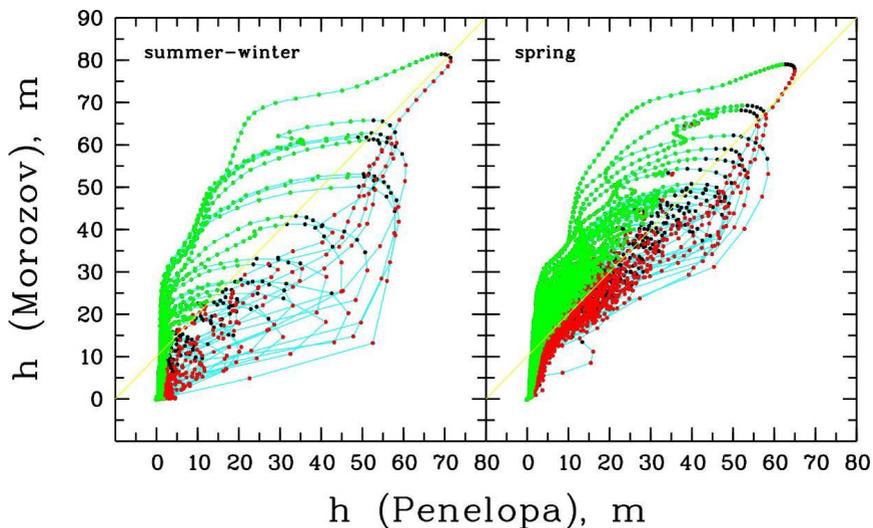


Рис. 14. Профили изменений уровня воды в зале Пенелопы и на оз. Морозова в летне-зимний период с 22 июня по 27 февраля (слева) и в период весенних паводков с 27 февраля по 22 июня (справа). Голубые кривые – временные треки уровня h . Красные точки – замеры в период подъема воды в зале Пенелопы, зеленые точки – замеры в период спада воды на оз. Морозова, черные точки – замеры в период, когда вода спадает в зале Пенелопы, но поднимается на оз. Морозова. Желтые прямые – линии равных уровней воды по абсолютной высоте н.у.м.

Отметим отсутствие корреляции между значениями максимального уровня подъема воды в зале Пенелопы и на оз. Морозова в случае крупных паводков. Встречаются самые разнообразные случаи; вода в зале Пенелопы может подниматься как на 10 и более метров выше, так и на 10 м ниже, чем на озере Морозова (табл. 4). В таблицу не были включены несколько паводков, когда вода на озере Морозова поднималась выше отметки 20 м, но не достигала этих значений в зале Пенелопы. Обратных случаев, когда вода в зале Пенелопы поднималась на 20 м, а на оз. Морозова – не зафиксировано.

В случае мелких паводков, а также во время весеннего половодья, вода на оз. Морозова поднимается, как правило, на 5–15 м выше, чем в зале Пенелопы (рис. 3). Хотя сравнивать объемы воды в зале Пенелопы и на оз. Морозова некорректно из-за разницы в площадях над местами установки логгеров, усредненный по всем измерениям уровень воды на оз. Морозова почти на 3 метра превышает уровень в зале Пенелопы: 5,07 против 2,26 м.

Обсуждение результатов. Несмотря на то, что расстояние между логгерами в зале Пенелопы и на озере Морозова не превышает 800 м, полученные результаты указывают на существование двух независимых гидрологических и климатических систем в донной части Снежной. Одна из них связана с рекой Снежной и включает зал Пенелопы, зал Икс и старую часть пещерной системы. Вторая – связана с Новой рекой и включает в себя Тронный зал, озеро Морозова и всю новую часть пещеры, в том числе, – систему Фантазия-Хренова Яма. Границей между ними является, по-видимому, завал и зал Метростроя (рис. 1).

Температурный и водный режимы в старой и новой частях системы существенно различны. Паводки на оз. Морозова (в новой части пещерной системы) происходят с задержкой относительно старой части, дренируемой р. Гужва. Высоты подъема воды во время паводков в старой и новой частях неожиданно слабо коррелируют друг с другом.

Температура воды в гидросистеме Татьяниной реки оказалась на примерно $0,2^{\circ}\text{C}$ выше, а диапазон ее колебаний заметно выше, чем в гидросистеме р. Гужва. Между температурами воздуха в старой и новой частях системы Снежной наблюдаются еще более кардинальные отличия.

Полученные данные можно интерпретировать существенными различиями в морфологии старой и новой частей пещерной системы. Морфология старой части системы нам известна достаточно хорошо. Подземная река Гужва исследована на протяжении 6,3 км с высоты 1700 м, а ее верхние притоки – с высоты 2250 м. Известно 4 входа в старую часть системы, верхний из которых расположен практически на гребне Раздельного хребта. Новая часть системы Снежной известна нам значительно хуже.

Разницу между температурами воздуха в различных частях системы Снежной можно, по-видимому, объяснить тем, что на оз. Морозова (высота установки барологтера 720 м) фиксировался относительно сухой воздух. Его температура почти на $0,5^{\circ}\text{C}$ превышает температуру воздуха в зале Пенелопы и практически постоянна в течение всего года. Это может свидетельствовать об относительно малом охлаждении воздуха водными потоками гидросистемы Татьяниной реки, т. е. об относительно больших «сухих» объемах новой части пещеры, а также об отсутствии значительных по объему воздушных потоков (тяги воздуха).

Температура воздуха в зале Пенелопы отражает температуру воздушных масс, сильно охлаждаемых водными потоками. Профиль температуры коррелирует с температурой воды; его поведение схоже с изменениями температуры воздуха на дне пещеры Крубера [1]. Зная морфологию этой части системы, данный результат не должен вызывать удивления: системообразующая роль р. Гужвы и ее притоков, а также значительные движения воздушных масс в формировании климата старой части пещерной системы Снежной хорошо известны [1, 2, 4].

Отметим, что температура воздуха в пещере ($+6,0^{\circ}\text{C}$ для влажного и $+6,5^{\circ}\text{C}$ для сухого воздуха) не соответствует температуре воздуха на той же высоте над уровнем моря. Средняя температура в Сочи на период 2015-19 гг. составила $+15,3^{\circ}\text{C}$, что соответствует температуре примерно $+11,1^{\circ}\text{C}$ на высоте 700 м н.у.м. Несоответствие температур в пещере и на поверхности на той же высоте является известным фактом (см., например, [1]).

При этом температурные характеристики воздуха в Снежной хорошо согласуются с данными, полученными в пещере Крубера на соседнем массиве Арабика, где температура воздуха $+6^{\circ}\text{C}$ зафиксирована на глубине -1650 м, что соответствует абсолютной высоте 600 м. [12].

Разницу в водном режиме в старой и новой частях системы Снежной: превышение температуры воды в новой части на $0,3^{\circ}\text{C}$ зимой и на $0,1-0,15^{\circ}\text{C}$ летом и задержка максимумов паводков на 3-5 часов в новой части – можно было бы объяснить более долгим путем, проходимым водными потоками, и большей абсолютной высотой истоков Татьяниной реки. Однако более детальный анализ позволяет отвергнуть эту гипотезу. Разница температур воды в $0,1-0,3^{\circ}\text{C}$ соответствует, по данным вертикального профиля температуры в Снежной (около $0,5^{\circ}\text{C}/100$ м высоты [4]) или в Крубера ($0,3^{\circ}\text{C}/100$ м [12]), разнице в высоте истоков менее 100 м. Продолжительность подъема воды при паводках в новой части в два раза превышает время подъема в старой части (табл. 4), что соответствовало бы расстоянию до истоков Татьяниной реки более 10 км.

Зная расположение старой части пещеры – гидросистемы р. Гужва относительно поверхности Хистинского массива, предположить, что длина гидросистемы Татьяниной реки в 1,5-2 раза больше, а ее истоки находятся выше р. Гужва, сложно. Гораздо вероятнее предположение о том, что большие температуры и большая продолжительность подъема воды при паводках связана с более узкими каналами для водных потоков в новой части системы Снежной. Тогда и дополнительный нагрев воды, и меньшую скорость подъема воды можно объяснить задержкой при прохождении через узкие трещины и поры и теплообменом с окружающими горными породами.

Расход р. Татьяниной оценивается в среднем в 2 раза ниже, чем расход р. Гужва. Водосборная площадь гидросистемы новой части также должна быть примерно в 2 раза меньше. При этом на плане местности район Метростроя находится почти точно посередине лесной зоны Хипстинского массива. Можно предположить, что относительно большая часть водосбора Татьяниной реки приходится на зону леса западнее тропы подъема на массив. Задернованность поверхности в зоне леса создает худшие условия для свободного прохождения воды с поверхности в глубь массива.

Хотя паводки в старой и новой частях системы Снежной происходят одновременно, их относительная мощность (измеряемая относительной высотой подъема воды) различна в гидросистемах реки Гужва и Татьяниной реки (табл. 4). Это говорит о некоторых качественных отличиях в географии водосборных участков. Учитывая зональность выпадения осадков в горных зонах, включая Хипстинский массив, можно предположить, что относительно более мощные паводки в новой части вызваны осадками в зоне леса, а относительно более мощные осадки в старой части – осадками в луговой зоне (либо – на всем массиве). Для многочисленных мелких паводков их относительная мощность выше на оз. Морозова, что может свидетельствовать об осадках в зоне леса, более частых, чем в луговой зоне.

Профили паводков показывают, что водные резервуары в старой и новой частях системы Снежной не сообщаются друг с другом. Хотя при наиболее мощных паводках, когда высота подъема воды превышает 60 м в зале Пенелопы и 70 м на озере Морозова, абсолютный уровень воды сравнивается на подъеме (рис. 14), максимумы подъемов не совпадают по времени, а спад воды происходит с разной скоростью и при разных абсолютных уровнях.

Максимальные уровни подъема воды в старой и новой частях системы, как известно, лежат ниже перемычки в зале Метростроя (рис. 1, см. также [11]). Результаты нашего мониторинга говорят о том, что связь через возможные щели на более низких высотах между Тронным залом и залами Пенелопа-Икс также отсутствует.

Максимальный уровень подъема воды соответствует абсолютной высоте 715 м н.у.м. (отметка -1675 м от верхнего входа) для обеих частей пещерной системы (рис. 1, 14). Данный уровень лежит ниже дна Тронного зала и примерно соответствует месту установки барологгера в Петином меандре (рис. 1). Этот уровень примерно на 20 м ниже оценок уровня максимального затопления Тронного зала и зала Икс (рис. 1, см. также [1]) Вопрос, является ли зафиксированный за 4,5 года максимальный уровень подъема воды действительно наибольшим за длительные промежутки времени (десяtkи лет) или же залы затапливаются через верхние притоки (например, – Тронный зал через Орешковский Ручей) и их уровень затопления выше из-за закупоривания узостей, чем на реках, требует дополнительных исследований.

Зная расход (200 л/с) и скорость (0,2 м/с) межленного расхода воды на р. Гужва [4] можно оценить порядок величины выходного сечения в старой части системы, составляющее около 1 м³. Профили паводков в зале Пенелопы хорошо описываются теоретическими формулами, хотя и осложнены переменным вертикальным профилем сечений (рис. 12). Это говорит о свободном уходе воды.

В новой части (на оз. Морозова) спад воды происходит крайне медленно, по линейному, а не экспоненциальному закону (рис. 13). При этом, вертикальный профиль сечений, по-видимому, постоянен. Такое медленное падение свидетельствует об отсутствии каналов свободного выхода воды (либо о сечении каналов на порядок и более меньших, чем 1 м³). По-видимому, вся вода в новой части системы уходит в сифон оз. Морозова; сухопутная часть между Татьяниной рекой в районе оз. Морозова и в районе Старого дна (см. рис. 1) отсутствует.

Заключение. Проведен анализ данных мониторинга уровня и температуры воды в январе 2015 г. – июле 2019 г. и температуры воздуха в январе 2015 г. – феврале 2016 г. в

старой (зал Пенелопы) и новой (оз. Морозова) частях донной галереи пещерной системы Снежной с интервалом измерений 1 час.

Период весенних паводков начинается в начале марта – начале апреля и продолжается до конца июня. Летне-осенний период межени с редкими мощными паводками продолжается с конца июня – начала июля до начала ноября – начала декабря. Период зимней межени, наиболее безопасный для посещения пещеры, продолжается с конца ноября – начала декабря по начало – середину марта.

Среднее значение температуры воды в зале Пенелопы составляет $+5,92 \pm 0,13^\circ\text{C}$ и лежит в диапазоне от $+5,32^\circ\text{C}$ до $+6,16^\circ\text{C}$, а на оз. Морозова – $+6,08 \pm 0,21^\circ\text{C}$ с минимальным и максимальным значениями $+5,56^\circ\text{C}$ и $+6,60^\circ\text{C}$. За исключением периода второй половины весеннего паводка, температура воды на озере Морозова выше, а диапазон ее изменений больше, чем в зале Пенелопы. Максимальная разность температур $0,15\text{--}0,35^\circ\text{C}$ наблюдается в зимний период и на начальной стадии весенних паводков.

Температура воздуха в зале Пенелопы лежит в пределах от $+5,77$ до $+6,16^\circ\text{C}$ со средним значением $+6,00 \pm 0,10^\circ\text{C}$. Температура воздуха на оз. Морозова на $0,3\text{--}0,7^\circ\text{C}$ выше и практически не меняется в течение года, колеблясь в пределах от $+6,41$ до $+6,53^\circ\text{C}$ со средним значением $+6,47 \pm 0,02^\circ\text{C}$. Это может свидетельствовать об относительно малом охлаждении воздуха водными потоками гидросистемы Татьяниной реки и более «сухом» воздухе в новой части системы Снежной.

Температура воздуха в зале Пенелопы близка к температуре воды в течение всего года, кроме июня, когда она на $0,2\text{--}0,3^\circ\text{C}$ выше. При этом зимой температура воздуха выше температуры воды в период межени и ниже – во время паводков. В летне-осенний период наблюдается обратная картина: температура воздуха ниже температуры воды в период межени и выше – во время паводков. На оз. Морозова температура воздуха выше температуры воды, исключая моменты некоторых осенних и зимних паводков. Максимальная разница наблюдается в июне, когда воздух на озере Морозова теплее воды на $0,8^\circ\text{C}$.

Наблюдается обратная зависимость между температурой воздуха на поверхности и температурой воды и воздуха в донной части пещеры. Максимальные значения температуры воды и воздуха в пещере фиксируются зимой, а минимальные – в июне, в конце периода весенних паводков.

Температура воды в пещере чувствительна к осадкам на поверхности. Резкое повышение температуры воды на $0,1\text{--}0,3^\circ\text{C}$ является индикатором осадков, хотя может и не вызвать заметного паводка. Максимальные изменения температуры воды фиксируются во время мощных летних паводков, когда часовые изменения температуры достигают значений $-0,30$ - $+0,26^\circ\text{C}/\text{час}$ в зале Пенелопы и $-0,27$ - $+0,49^\circ\text{C}/\text{час}$ – на озере Морозова. Изменения температуры воздуха в зале Пенелопы во время паводков могут достигать значений $-0,13$ - $+0,06^\circ\text{C}/\text{час}$, а на оз. Морозова – не превышают $0,03^\circ\text{C}/\text{час}$.

Корреляция между количеством осадков в г. Сочи и уровнем подъема воды в донной части пещерной системы в летнее время крайне слабая. Сильные ливни в г. Сочи могут не вызвать значительные паводки в пещере; наоборот, время мощных паводков в Снежной может совпадать с отсутствием дождей в г. Сочи.

Максимальная высота подъема уровня воды в зале Пенелопы достигает 58-59 м для одиночных паводков и 58-60,5 м – для протяженных паводков. На оз. Морозова высота подъема воды в случае протяженных паводков на 10-15 м больше, чем при одиночных: 61-66 м против 50-53 м. Во время самого мощного паводка 28 ноября – 3 декабря 2018 г. максимальные уровни подъема воды составили 71,5 м в зале Пенелопы и 81,4 м – на оз. Морозова.

В зале Пенелопы характерные значения максимальной скорости подъема воды составляют 30-38,5 м/час в случае одиночных и 17-30 м/час при протяженных паводках, на оз. Морозова максимальные значения равны 13,6-14,7 и 9-10,5 м/час, соответственно.

Максимальные скорости подъема воды достигаются во время одиночных паводков за 1-3 часа до максимума подъема воды в зале Пенелопы и за 4-5 часов – на оз. Морозова. В случае протяженных паводков максимальные скорости подъема воды и резкие колебания температуры воды и воздуха фиксируются во время первой волны паводка, даже если она не является самой мощной.

Относительная мощность паводков (измеряемая относительной высотой подъема воды) различна в гидросистемах реки Гужва и Татьяниной реки. Это можно объяснить зональными (высотными) различиями в водосборных участках старой и новой частей пещерной системы.

Водные резервуары в старой и новой частях системы Снежной не сообщаются друг с другом. Гидрологическая связь через возможные щели на более низких высотах относительно зала Метростроя между Тронным залом и залами Пенелопа-Икс также отсутствует.

Медленный, линейный по времени спад воды на оз. Морозова свидетельствует об отсутствии каналов свободного выхода воды. По-видимому, вся вода в новой части системы уходит в сифон оз. Морозова; сухопутная часть между Татьяниной рекой в районе озера Морозова и в районе Старого дна отсутствует.

Результаты указывают на существование двух независимых гидрологических и климатических систем с существенными различиями в морфологии старой и новой частей пещерной системы в донной части Снежной. Одна из них связана с гидросистемой реки Гужва, вторая – с гидросистемой Татьяниной реки. Границей между ними является, по-видимому, завал и зал Метростроя.

Высказано предположение, что относительно большая часть водосбора Татьяниной реки приходится на зону леса. Условия на поверхности в зоне леса: задернованность и относительно мелкие трещины – создают худшие условия для свободного прохождения воды с поверхности в глубь массива. Более высокая относительная мощность мелких паводков на оз. Морозова может свидетельствовать об осадках в зоне леса, более частых, чем в луговой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас пещер России / Ред. Шелепин А.Л., Вахрушев Б. А., Гунько А. А., Гусев А. С., Прохоренко А. И., Самохин Г. В., Филиппов А. Г., Цурихин Е. А. М.: Русское геогр. об-во, Российский союз спелеологов, 2019. – 768 с.
2. Mavlyudov B.R. The Snezhnaya–Mezhennogo–Ilyuziya cave system in the western Caucasus // *Boletín Geológico y Minero*. – 2016. – V. 127. – No 1. – P. 219–235.
3. Гусев А. С. Гидрология подземных вод Хипстинского массива (Абхазия) // *Вопросы географии*. – Вып. 147. – Спелеология и карстование / Отв. ред. В. М. Котляков, Б. Р. Мавлюдов. – М.: Изд. дом «Кодекс», 2018. – С. 107–133.
4. Предварительный отчет об исследованиях пещеры «Снежная» Западно-Кавказским карстово-гляциологическим отрядом отдела гляциологии Института географии АН СССР (июнь-июль, 1979 г.), научный руководитель: чл.-корр. АН СССР В. М. Котляков, исполнители: Б. Р. Мавлюдов, Д. А. Усиков. М., 1979.
5. Людковский Г. В., Мавлюдов Б. Р., Морозов А. И., Немченко Т. А., Усиков Д. А. Об исследовании Снежной – глубочайшей карстовой пещеры СССР // *ДАН*. – 1981. – Т. 259. – № 2. – С. 437–442.
6. Вахрушев Б. А., Дублянский В. Н., Амеличев Г. Н. Карст Бзыбского хребта. Западный Кавказ. М., Российский ун-т дружбы народов, 2001. – 165 с.
7. Мавлюдов Б. Р. О геологии пещерной системы Снежная–Меженного–Иллюзия (Западный Кавказ) // *Комплексное использование и охрана подземных пространств. Междунар. науч.-практич. конф., посвящ. 100-летию юбилею научной и туристско-*

- экскурсионной деятельности в Кунгурской Ледяной пещере и 100-летию со дня рождения В. С. Лукина. Пермь: Геологич. Ин-т Уральского отделения РАН, 2014. – С. 30–39.
8. Мавлюдов Б. Р. Карст и пещеры Хипстинского карстового массива. Спелеология и спелестология. – 2018. – №9. – С. 23–31.
9. Гусев А. С., Мазина С. Е. Движение карстовых вод системы Снежная (Западный Кавказ): результаты индикаторного опыта 2010 года // Спелеология и спелестология: развитие и взаимодействие наук. Сб. материалов Междунар. науч.-практич. конф. Набережные Челны: Набережночелнинский педагогич. ун-т, 2010. – С. 121–124.
10. Гусев А. С., Мазина С. Е. Результаты индикаторных опытов и движение карстовых вод в южной части Хипстинского массива (Западный Кавказ) // Комплексное использование и охрана подземных пространств. Междунар. науч.-практич. конф., посвящ. 100-летию юбилею научной и туристско-экскурсионной деятельности в Кунгурской Ледяной пещере и 100-летию со дня рождения В. С. Лукина. Пермь: Геологич. ин-т Уральского отделения РАН, 2014. – С. 99–107.
11. Дегтярев А. По ту сторону Снежной: что дальше? // Свет. – 2009. – № 1 (35). – С. 6-17.
12. Климчук А. Б., Касьян Ю. М. Распределение температуры в карстовых системах: данные по глубоким пещерам массива Арабика // Свет. – 2005. – № 1 (27). – С. 20–24.