

В-третьих, относительной «свежестью» и плотностью, обнажающихся в воронках, карстующихся гипсов. Гипсы с поверхности менее выветрены. В-четвёртых, преобладанием суффозионно-коррозионных и эрозионно-коррозионных воронок (на Биш-чохо преобладают коррозионные и провальные воронки, а в меньшей степени воронки других типов).

В-пятых, карстующиеся гипсы (в основании обнажений) средне- и мелкозернистые, менее перематы складками.

Скорее всего, эти отличительные особенности говорят о самостоятельности развития карста на этих близлежащих территориях, о различной активности и «молодости» (в возрастном отношении) развивающихся там карстовых процессов, обусловленной (предположительно) разной активностью Биш-чоховского и Худайбергенского соляных куполов.

Территория солянокупольного поднятия Худайберген (Кудайберген) требует дальнейшего детального карстолого-спелеологического обследования. Секция спелеологии и карстоведения Астраханского отделения РГО ближайшие годы планирует продолжить обследование этого интересного карстового района. Полученные данные позволят глубже понять историю формирования рельефа Северного Прикаспия.

Список использованных источников

1. Богданов А.А. Соляные купола Нижнего Заволжья. // Бюллетень МОИП, отд. геол., т. XII. - М., 1934.
2. Головачев И.В. Карст и пещеры Северного Прикаспия [Текст]: монография / И.В. Головачев. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2010.–215 с.
3. Головачев И.В. Особенности сульфатного карста Северного Прикаспия / И.В. Головачев // Современные проблемы географии: межвузовский сборник научных трудов / сост.: В.В. Занозин, М.М. Июлин, А.Н. Бармин. А.З. Карабаева, М.В. Валов. – Астрахань: Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет», 2019. – Вып. 3. – С. 26-36.
4. Головачёв И.В. Характеристика карстового рельефа на поднятии Худайберген / И.В. Головачев // Геология, география и глобальная энергия. — 2019.— № 3 Вып. 74. С. 77-86.

УДК 551.44

ВОДНЫЙ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМЫ В ДОННОЙ ЧАСТИ ПЕЩЕРНОЙ СИСТЕМЫ СНЕЖНАЯ (ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ). ОЦЕНКА ВОДНОГО БАЛАНСА СИСТЕМЫ

А.С. Гусев

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, gusev@sai.msu.ru

Аннотация. Пещерная система Снежная (Хипстинский высокогорный карстовый массив) является крупнейшей пещерой на Кавказе. Гидрологическая сеть пещеры включает две основные независимые реки. Мы представляем результаты анализа данных мониторинга уровня и температуры воды и температуры воздуха в 2015-2019 годах на обеих реках в нижних галереях пещерной системы. Исследованы сезонные изменения и корреляции водного и температурного режимов в пещере. На основе данных трехмерной карты пещеры и изменений объема воды в конце одиночных паводков была восстановлена модель водного баланса обеих рек в приближении закона Бернулли для идеальной жидкости. Были оценены расходы воды на входах в нижние галереи пещерной системы и на выходах из них.

Ключевые слова: Снежная, Кавказ, пещера, мониторинг, гидрология, водный баланс.

WATER AND TEMPERATURE REGIMES IN THE BOTTOM PART OF THE SNEZHNYAYA CAVE SYSTEM (WESTERN CAUCASUS). ESTIMATION OF WATER BALANCE OF THE SYSTEM

A.S. Gusev

Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, gusev@sai.msu.ru

Annotation. Snezhnaya cave system (alpine karst Khipsta massif) is the largest cavern in the Caucasus. The hydrological network of the cave includes two main separate rivers. We present the results of the analysis of monitoring data for water level and temperature and air temperature in 2015-2019 on the both rivers in the bottom galleries of the cave system. Seasonal changes and correlations in water and temperature regimes in the cave are investigated. Based on the data of the 3D map of the cave and changes in water volume at the end of single flashfloods, a water balance model was reconstructed for both rivers in the approximation of Bernoulli's principle for a perfect fluid. The water discharges at the entrances to the bottom galleries of the cave system and at the exits from it was estimated.

Key words: Snezhnaya, Caucasus, cave, monitoring, hydrology, water balance.

Введение. Пещерная система Снежная расположена на южном склоне Кавказа (Хипстинский массив Бзыбского хребта). По морфометрическим параметрам это самая длинная карстовая полость на Кавказе (общая длина ходов более 41 км) и четвертая по глубине пещера в мире (амплитуда 1760 м). Шесть известных входов в систему расположены на высотах от 2389 до 1318 м н.у.м. [1]. Объем пещерной системы оценивается в 2,7 миллионов м³ [6]. Большая часть объёма приходится на донные области, где расположены самые большие залы системы [1].

Пещерная система имеет хорошо развитую гидрологическую сеть [3, 6]. Уникальность полости заключается в наличии двух независимых гидрологических систем, которые до сих пор не были соединены. Пещерная река Гужва изучена на протяжении 6,3 км («старая» часть системы). С противоположной стороны под таким же донным завалом протекает такая же крупная Татьяна река, изученная на протяжении более 1 км («новая» часть системы). Самая глубокая точка системы (-1760 м) в настоящее время представляет собой сифон на дне озера Морозова, расположенного на Татьяниной реке (рис. 1а).

Хипстинский массив и пещерная система Снежная достаточно хорошо изучены как с точки зрения геологии, так и гидрологии (см. [1, 3, 6] и ссылки в них). Систематические мониторинговые замеры уровня воды, температуры воды и воздуха в пещерной системе до недавнего времени не проводились. В данной работе мы приводим анализ результатов мониторинга, опубликованные частично в статьях [4, 5]. В настоящей статье мы подробнее остановимся на методике расчёта и анализу водного баланса пещерной системы [5], не введенными ранее в научный оборот на русском языке.

Проведение эксперимента по мониторингу и обработка данных. В мониторинге использовались две пары датчиков. Каждая из них состоит из двух устройств: барологера, измеряющего температуру воздуха t_{air} и уровень компенсации l_{comp} (аналог атмосферного давления), и гидрологгера, измеряющего температуру t_{water} и давление (уровень) воды h . Параметры измерялись синхронно с интервалом в 1 час.

Датчики были установлены во время зимней экспедиции 2014-2015 гг. Барологеры были демонтированы в феврале 2016 года, а гидрологгеры – в ходе зимней экспедиции 2019-2020 гг. Первая пара датчиков была установлена в районе зала Пенелопы (гидрологгер на высоте 645 м н.у.м.), вторая пара у озера Морозова (635 м н.у.м., рис. 1а).

Полученная база данных включает 39714 отсчётов уровня и температуры воды, 9257 отсчётов температуры воздуха и уровня компенсации в зале Пенелопа и 39591 и 9208 отсчётов, соответственно, – на озере Морозова (рис. 1б). Подробное описание мониторингового эксперимента и обработки данных дано в работе [4].

Метод оценки водного баланса. Наш метод основан на уравнении неразрывности течения жидкости: $Q_1 - Q_2 - |Q_3| = 0$, где Q_1 - приход воды на входе, Q_3 - расход воды на выходе, Q_2 - изменение объёма воды в измеряемой полости. Объем воды Q_2 был рассчитан с использованием трёхмерной

карты пещерной системы. Мы оценили площади горизонтальных сечений S_2 в зависимости от высоты h над точками измерений как для «старой» (зал Пенелопы), так и для «новой» (озеро Морозова) частей пещерной системы. Полученный объем $V_2(h)=S_2(h)h$.

Примем, что в конце мощных летних одиночных паводков (см. рис. 1б) $Q_1 \ll |Q_2| \approx |Q_3|$. Примем также, что $S_3 \ll S_2$, где S_3 - площадь выходного сечения для потока воды. Таким образом, мы можем использовать закон Торричелли как частный случай принципа Бернулли для идеальной жидкости: $V=(2gh)^{0,5}$, где V - скорость воды на выходе, g - ускорение свободного падения.

Отметим, что в работе [4] нами было установлено отсутствие гидрологической связи между «старой» и «новой» частями пещерной системы (см. ниже), т.е. обе части полости можно рассматривать отдельно. Ещё одним условием правильного применения закона Торричелли является отсутствие дополнительных, более верхних каналов выхода воды.

Таким образом, учитывая, что $Q_3=VS_3$, мы используем окончательное уравнение $|Q_2|=S_3(2g(h+y))^{0,5}$, где y - разница высот между гидрологгером и каналом выхода воды.

Находя коэффициенты линейной регрессии на диаграмме Q_2^2 от h (рис. 1в), можно получить и S_3 , и y : если $Q_2^2=Ah+B$, то $S_3=(A/2g)^{0,5}$ и $y=B/A$. При отсутствии верхних каналов выхода воды, S_3 и y являются постоянными величинами, поэтому можно использовать формулу $|Q_3|=S_3(2g(h+y))^{0,5}$ для любых водных режимов, включая меженные. Такая ситуация наблюдается на озере Морозова, где имеется одна донная галерея, а вода уходит в сифон (рис. 1а).

«Старая» часть пещеры представляет собой сложный трёхмерный лабиринт с многочисленными завалами, колодцами, горизонтальными и наклонными ходами. Анализ зависимости Q_2^2 от h для зала Пенелопы показал, что линейная зависимость $Q_2^2 \sim h$ сохраняется до уровня $h \approx 5,7$ м, а полученное значение $y = -5,3$ м, т.е. канал выхода воды находится выше уровня установки гидрологгера. Для меженного уровня воды в зале Пенелопы закон Торричелли неприменим. Поэтому мы исследовали зависимость Q_2^2 от h для $h < 5,7$ м на диаграмме $\lg Q_2 - \lg h$ и получили эмпирическую зависимость $Q_2 \sim h^{2,42}$ (рис.

1г), где показатель степени 2,42 зависит от геометрической формы сечения выходного канала. При расчёте минимальных расходов воды также учитывался минимальный расход реки Гужвы ≈ 200 л/с. Минимальный расход Татьяниной реки получился непосредственно из расчетов водного баланса равным 130 л/с.

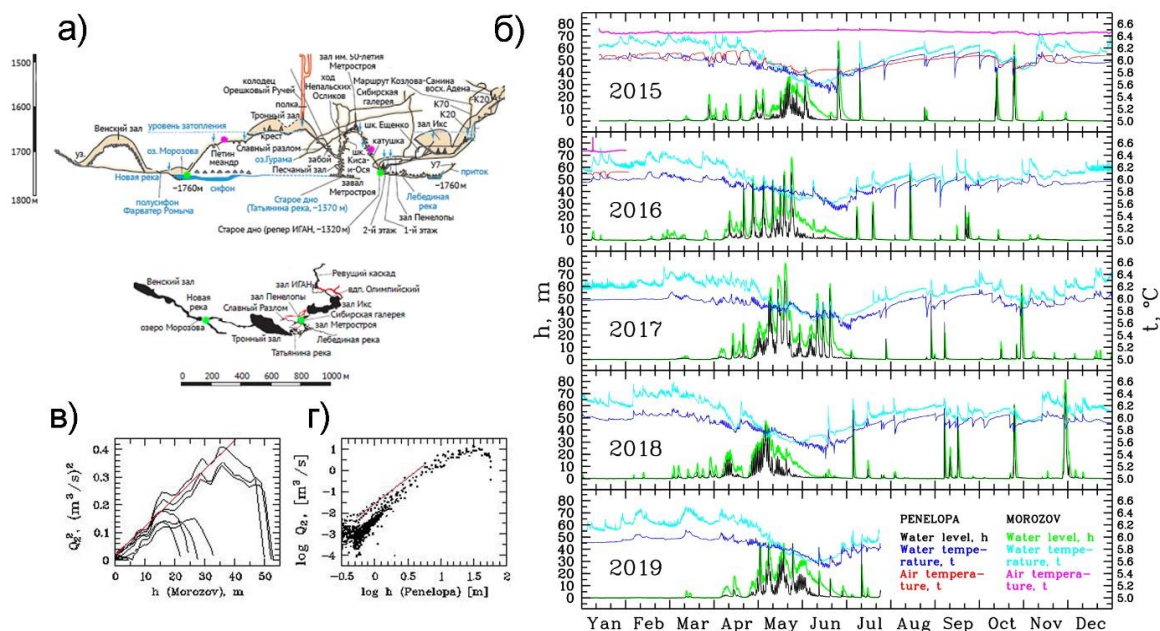


Рис. 1. План и разрез-развертка донной части системы Снежная [1] с указанием мест расположения логгеров. Зелёным цветом отмечены места установки гидрологгеров, фиолетовым – барологгеров (только на разрез-развертке) (а).

Профили уровня подъема воды (черные и зеленые кривые), температуры воды (синие и голубые кривые) и воздуха (красные и розовые кривые) в зале Пенелопы (черные, синие, красные кривые) и на озере Морозова (зелёные, голубые и розовые кривые) (б). Диаграмма Q_2^2-h для окончаний одиночных летних паводков на озере Морозова (черные кривые). Красная линия - полученная линейная регрессия (в). Диаграмма $\lg Q_2 - \lg h$ для окончаний одиночных летних паводков в зале Пенелопы (черные точки). Красная линия - полученная зависимость $Q_2 \sim h^{2,42}$ (г)

Зная Q_2 и Q_3 , можно найти приход воды на входе $Q_1=Q_2+Q_3$. Корректность используемого метода подтверждается тем, что вычисленное $\Delta Q_1 > 0$ наблюдается, в пределах погрешности измерений, во всех случаях. Корректность использования закона Торричелли подтверждается линейной зависимостью между экспериментальными данными на диаграмме Q_2^2 от h (рис. 1в).

Здесь и далее формальные ошибки для ΔQ_n и коэффициентов регрессии не приводятся из-за значительного вклада ошибок в определении функции $S_2(h)$. Погрешность измерений ΔQ_n мы оцениваем в 20%.

Основные результаты. Хорошо видны сезонные особенности водного и температурного режимов в дне системы (рис. 1б). Различаются периоды зимней межени, весеннего половодья и летне-осенний период.

Минимальные значения температуры воздуха и воды в донной части пещерной системы отмечаются в июне, к концу весеннего половодья. И температура воды, и температура воздуха меняются очень плавно, исключая периоды паводков. Средняя t_{water} в зале Пенелопы $+5,92 \pm 0,13^\circ\text{C}$ и лежит в пределах от $+5,32^\circ\text{C}$ до $+6,16^\circ\text{C}$, а на озере Морозова $+6,08 \pm 0,21^\circ\text{C}$ с предельными значениями $+5,56^\circ\text{C}$ и $+6,60^\circ\text{C}$.

Изменения температуры воздуха гораздо меньше. В зале Пенелопы t_{air} и лежит в пределах от $+5,77$ до $+6,16^\circ\text{C}$ при среднем значении $+6,00 \pm 0,10^\circ\text{C}$. Температура воздуха на озере Морозова выше на $0,3-0,7^\circ\text{C}$ и не изменяется в течение года; она колеблется от $+6,41$ до $+6,53^\circ\text{C}$ при среднем значении $+6,47 \pm 0,02^\circ\text{C}$.

Отмечаются существенные различия между значениями и характером сезонных изменений как температуры воды, так и воздуха в зале Пенелопы и на озере Морозов (см. рис. 2а). Горизонтальные дорожки на рис. 2а связаны с паводками, когда температура воды резко меняется, а температура воздуха остаётся постоянной.

Абсолютные значения и сезонные изменения температуры воды в зале Пенелопы $t_{\text{water}}(P)$ и на озере Морозов $t_{\text{water}}(M)$ также заметно отличаются друг от друга (рис. 2б).

Большинство крупных летних паводков в пещере не единичны, а имеют два и более максимумов. Уровни воды в зале Пенелопы достигают 58-59 м при одиночных паводках и до 71,5 м при паводках с несколькими максимумами. На озере Морозова подъем уровня воды при длительных паводках на 10-15 м выше, чем при одиночных: 61-66 м против 50-53 м с максимальным $h=81,4$ м. Важным отличием паводкового режима в зале Пенелопы от озера Морозова является более плавный характер паводкового течения в последнем. Динамика изменения уровня подъёма воды в зале Пенелопы и на озере Морозова хорошо иллюстрируется на рис. 2в: равенство абсолютных уровней воды (над уровнем моря) достигается в зале Пенелопы и на озере Морозова не одновременно, а в те моменты, когда вода в зале Пенелопы начинает спадать, а на озере Морозова продолжает подниматься.

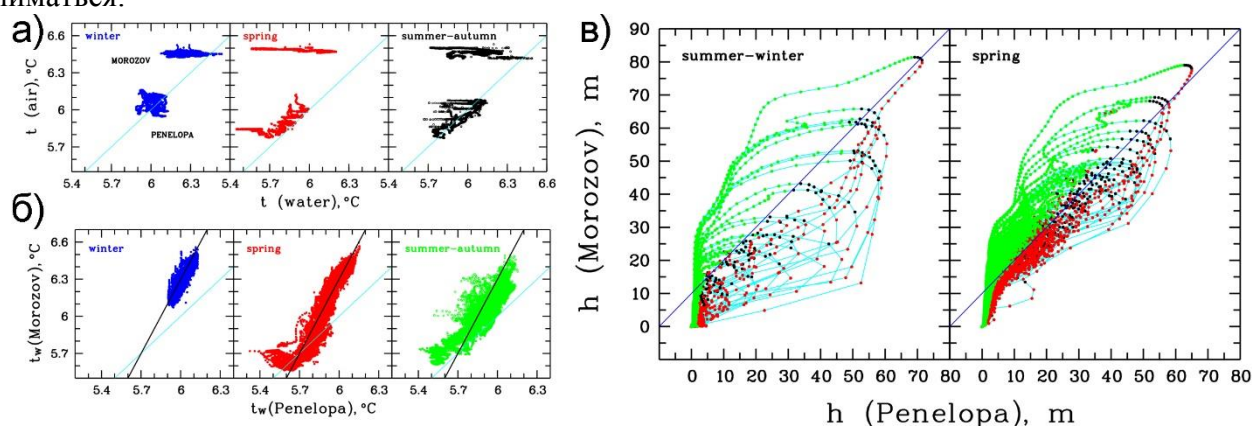


Рис. 2. Зависимость между температурой воды и воздуха в зале Пенелопы и на озере Морозова в зимний период, во время весенних паводков и летом-осенью. Голубые прямые - линии одинаковой температуры (а). Зависимость между температурой воды в зале Пенелопы и на озере Морозова в разные сезоны. Голубые прямые - линии одинаковой температуры (б). Профили изменений уровня воды в зале Пенелопы и на озере Морозова в летне-зимний период (слева) и в период весенних паводков (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 озере Морозова, черные точки - замеры в период, когда вода спадает в зале Пенелопы, но поднимается на озере Морозова. Синие прямые - линии равных уровней воды по абсолютной высоте н.у.м. (в)

Более подробный анализ температур воздуха и воды, их взаимосвязей и режимов паводков см. в работе [4].

Анализ водного баланса даёт средний расход воды $|Q_3|=1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ в зале Пенелопы и $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$ - на озере Морозова. Максимальные расходы на входе (Q_1) в зал Пенелопы и в озеро Морозова составляют $69,2$ и $5,04 \text{ м}^3/\text{с}$, соответственно, а на выходе из зала Пенелопа и озера Морозова (Q_3): $22,7$ и $0,93 \text{ м}^3/\text{с}$, соответственно. Максимальный зафиксированный объем воды в донной части пещерной системы - $5,3 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, что составляет 20% от общего объема пещерной системы Снежная. Полученный годовой сток составляет $0,04 \text{ км}^3$, при этом 4/5 его приходится на «старую» часть системы. Отметим, что хотя 80% объёма воды проходит через зал Пенелопы, средний ($6,6$ против $5,3 \text{ м}^3$) и максимальный объёмы ($4,1 \cdot 10^5$ против $1,3 \cdot 10^5 \text{ м}^3$) воды Q_2 больше на озере Морозова. Это связано с меньшей вместимостью «новой» части пещерной системы. Одним из следствий анализа зависимости Q_2^2 от h является нахождение максимального меженного расхода 130 л/с на Татьяниной реке. Дебиты ниже 130 л/с не вызывают подъёма уровня воды в озере Морозова.

Вторым следствием является оценка площади выхода в $0,63 \text{ м}^2$ для «старой» части пещерной системы.

Обсуждение и выводы. Профили изменений уровня воды показывают, что гидросистемы в «старой» и «новой» частях системы Снежная не сообщаются друг с другом.

Хотя расстояние между логгерами в зале Пенелопы и на озере Морозова не превышает 800 м , полученные результаты свидетельствуют о существовании двух самостоятельных гидролого-климатических систем со значительными различиями в морфологии и площади водосбора двух частей пещерной системы Снежная. На это указывают большие различия температурного и водного режимов в «старой» и «новой» частях системы.

Расход Татьяниной реки оценивается, в среднем, в 4-5 раз ниже стока реки Гужва. Площадь водосбора гидросистемы новой части также должна быть примерно в 4-5 раз меньше. Мы оценили в [3] суммарную минимальную и максимальную площади водосбора Снежной в $19,5$ и 31 км^2 , соответственно. Исключая части водосборов, которые расположены южнее дна пещеры в проекции на поверхность, минимальная и максимальная площади водосбора пещерных рек (Гужва и Татьяна) оцениваются в 15 и $18,5 \text{ км}^2$, соответственно. Используя эти данные и полученный годовой сток, мы оценили годовое количество осадков в $2100\text{-}2600 \text{ мм}$ (без годового испарения $500\text{-}800 \text{ мм}$). Наши оценки ближе к данным [2], давшим $2100\text{-}2300 \text{ мм}$ осадков с учетом годового испарения, чем к данным [6], $\approx 5000 \text{ мм}$.

Площадь водосбора Татьяниной реки оценивается нами всего в 3 км^2 , и она, по-видимому, полностью расположена в лесной зоне (см. карты в [3]).

Благодарности. Выражаю благодарность Анастасии Яниной, Гинтаутасу Швядасу, Татьяне Немченко, Виктору Шадрину, Айдасу Гудайтису, Бернардасу Паукштису, Алексею Шелепину, Александру Дегтяреву и Петру Ковешникову за постановку эксперимента по мониторингу и топографические данные пещеры.

Список использованных источников

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, М.: 2019. 768 с.
2. Гигинейшвили Г.Н. Карстовые воды Большого Кавказа и основные проблемы гидрогеологии карста. Тбилиси: Мецниереба, 1979. 222 с.
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. Гусев А.С., Швядас Г., Немченко Т.А., Шадрин В.О., Янина А.А. Водный и температурный режимы в донной части системы Снежная (Западный Кавказ, Абхазия) // Пещеры: сб. науч. тр. Вып. 43. Пермь. 2020. С. 60-82.
5. Gusev A.S. Water balance and temperature regime in the bottom part of the Snezhnaya cave system (Western Caucasus) // Proc. 18th Int. Congress of Speleology. Symposium 05 Karst

hydrogeology, physical chemistry. Le Bourget-du-Lac. 2022. P. 33-36.

6. Mavlyudov B.R. The Snezhnaya-Mezhennogo-Ilyuziya cave system in the western Caucasus // Boletín Geológico y Minero. V. 127. No 1. 2016. P. 219-235.

УДК 551.44

ПЕЩЕРА СЕВЕРНЫЙ СИФОН

В.Б. Еремеев

Русское географическое общество, руководитель учебного центра IRATA Alplight, Москва,
ropeworks@mail.ru

Аннотация. Северный Сифон - крупная линейная пещера с постоянно действующим водотоком. Итогом анализа результатов её топоосъёмки явилось открытие новой пещеры Среднесеверной, и после 13 лет работ в ней – объединение с Северным Сифоном в единую пещеру протяженностью 6239 м с упрощением доступа к дальней части пещеры для дальнейших исследований.

Ключевые слова: гипсовая пещера, Пинежский заповедник, Северный Сифон, Северный Лог, подземная река, раскопки.

SEVERNIY SIFON CAVE

V.B. Eremeev

Russian Geographical Society, head of the training center IRATA Alplight, Moscow
ropeworks@mail.ru

Annotation. The Severniy Siphon is a large linear cave with a permanent watercourse. The result of its detailed topographic mapping was the discovery of a new cave - the Srednesevernoy, and after 13 years of work in it - the unification with the Northern Siphon into a single cave with a length of 6239 m with simplification of access to the far part of the cave for further research.

Key words: gypsum cave, Pinezhsky Reserve, Severniy Siphon, Severniy Log, underground river, excavations.

Пещера Северный Сифон (рис. 1) является уникальным спелео-карстологическим объектом из-за своей приуроченности к действующему водотоку II-го порядка – подземной реке Сабурова, впадающему непосредственно в р. Пинега в виде субаквальных разгрузок в районе пещеры Большая Голубинская. Меженный расход реки в верхней части системы (вход Северного Сифона) составляет порядка 160 л/с. Паводковый расход тут превышает 1000 л/с.

Пещера представляет собой линейный комплекс разновозрастных проработок, где с рекой связаны современный эрозионные и коррозионно-эрозионные проработки преимущественно уплощённого сечения, контролирующиеся прослоями доломитов 0,3-0,7 м мощностью. Зачастую прослеживается два подуровня современных проработок: нижний, с действующей рекой и серией полностью затопленных участков ходов (сифонов), и верхний, затопляемый только в паводок. В разных местах современная проработка вскрывает фрагменты более древних пещер, часто значительных объёмов, развивавшиеся в иных спелео-гидродинамических условиях. Такие древние пещерные ходы на участке «Среднесеверная» четыре раза проходят под тальвегом Северного Лога туда и обратно.

Пещера найдена В.Н. Малковым в 1974 г., исследовалась в 1975 г. Ленинградской спелеосекцией, позднее в 1983 и 1991 гг. – Карстовым отрядом «Архангельскгеология». С 1998 г. исследование было продолжено В.Б. Еремеевым. Полевые работы проводились ежегодно на