

МНОГОПРОФИЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ

А. В. КРАСИКОВ, инженер, аспирант, alexeykrasikov55@gmail.com

А. С. КАЗАНЦЕВА, инженер, аспирант

М. В. БОГОМАЗ, инженер, аспирант

Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

Введение

Кунгурская Ледяная пещера находится на северо-восточной окраине г. Кунгура Пермского края, на правом берегу р. Сылва, на западном крыле Уфимского вала и входит в состав денудационной равнины Среднего Предуралья. Вход в пещеру располагается у подножия массива Ледяной горы, которая представляет собой платообразную закарстованную возвышенность и поднимается над днищами речных долин на 80–86 м [1–3].

В 1948 г. на базе Кунгурской Ледяной пещеры был создан Уральский филиал ККНИКС МГУ (карстово-спелеологическая станция). В 1952 г. эта станция была передана Уральскому филиалу АН СССР и реорганизована в научно-исследовательский стационар. В 1988 г. в г. Перми был организован Горный институт УрО РАН, в состав которого вошла Кунгурская лаборатория-стационар [4].

Сейчас сотрудники лаборатории проводят геологические, гидрогеологические, гидрохимические, микроклиматические и гляциологические исследования Кунгурской Ледяной пещеры (рис. 1) не только по отдельности, но и в совокупности, которые помогают понимать и контролировать многие процессы, происходящие в пещере.

Геологический мониторинг и маркшейдерский контроль

Пещера заложена в породах массива Ледяной горы, который считается классическим объектом развития сульфатно-карбонатного карста слоистой толщи в условиях краевой части платформы [5]. Первый план пещеры был составлен в 1703 г. известными картографами Семеном и Леонтием Ремезовыми. Первые наблюдения за геологическими процессами были проведены в 1930 г. В 1934 г. сотрудниками партии Гидростройпроекта была открыта заповедная часть пещеры.

Геологический мониторинг в Кунгурской Ледяной пещере на сегодняшний день состоит из комплекса мероприятий, включающего в себя изучение сводов, обвалоопасных участков в пределах экскурсионной тропы, обследование существующих защитных сооружений пещеры, предотвращение обрушений и укрепление

Приведены результаты геологических, гидрогеологических, маркшейдерских, геохимических, микроклиматических и гляциологических исследований Кунгурской Ледяной пещеры. За многолетний период наблюдений выявлено изменение климатических параметров, морфометрических характеристик, состава и качества подземных вод, изучена динамика оледенения в гротах в зависимости от сезона.

Ключевые слова: Кунгурская Ледяная пещера, Кунгурская лаборатория-стационар, мониторинговые наблюдения, карст, карстовый массив, многолетние изменения, режим.

DOI: 10.17580/gzh.2018.06.13

сводовой части гротов и осыпей. Прогноз обвального процесса и возможность управления состоянием локальных участков горного массива в пределах тропы невозможны без учета особенностей геологического строения, выявления факторов, определяющих состояние кровли гротов [6, 7].

За время эксплуатации пещеры были пробиты 4 тоннеля общей протяженностью более 200 м. Построено более 35 защитных бутобетонных стенок и 30 подпорных колонн, установлены 150 анкеров на всей протяженности экскурсионной части пещеры. Ежедневно ведут наблюдения за состоянием возведенных искусственных сооружений.

Обвальные процессы формируются за счет различных факторов, таких как раздробленность сульфатно-карбонатной толщи, гидратация ангидрита, морозное выветривание, физико-механические свойства горных пород. Всего за время наблюдений (с 1929 г.) в пещере зафиксирован 151 обвал, наибольшее число обвалов произошло в период с 1970 по 1980-е годы, что было связано с проходкой выходного тоннеля. Наибольшее число обвалов произошло в гротах Великан и Вышка – 18 и 21 соответственно. Для обеспечения безопасности были проведены работы по установке наблюдательной сети, состоящей из деформационных мониторинговых марок, привязанных к опорной маркшейдерской сети. Разработанная система мониторинга позволяет контролировать динамику развития опасных процессов как в кровле, так и в стенках полости, что позволяет обезопасить экскурсионную часть пещеры.

Маркшейдерский контроль включает составление планов земной поверхности в пределах горного отвода, топографические съемки для уточнения морфометрических показателей подземных галерей и гротов, а также проведение повторяющихся циклов измерений устойчивости кровли над экскурсионной тропой на пунктах опорно-маркшейдерской сети.

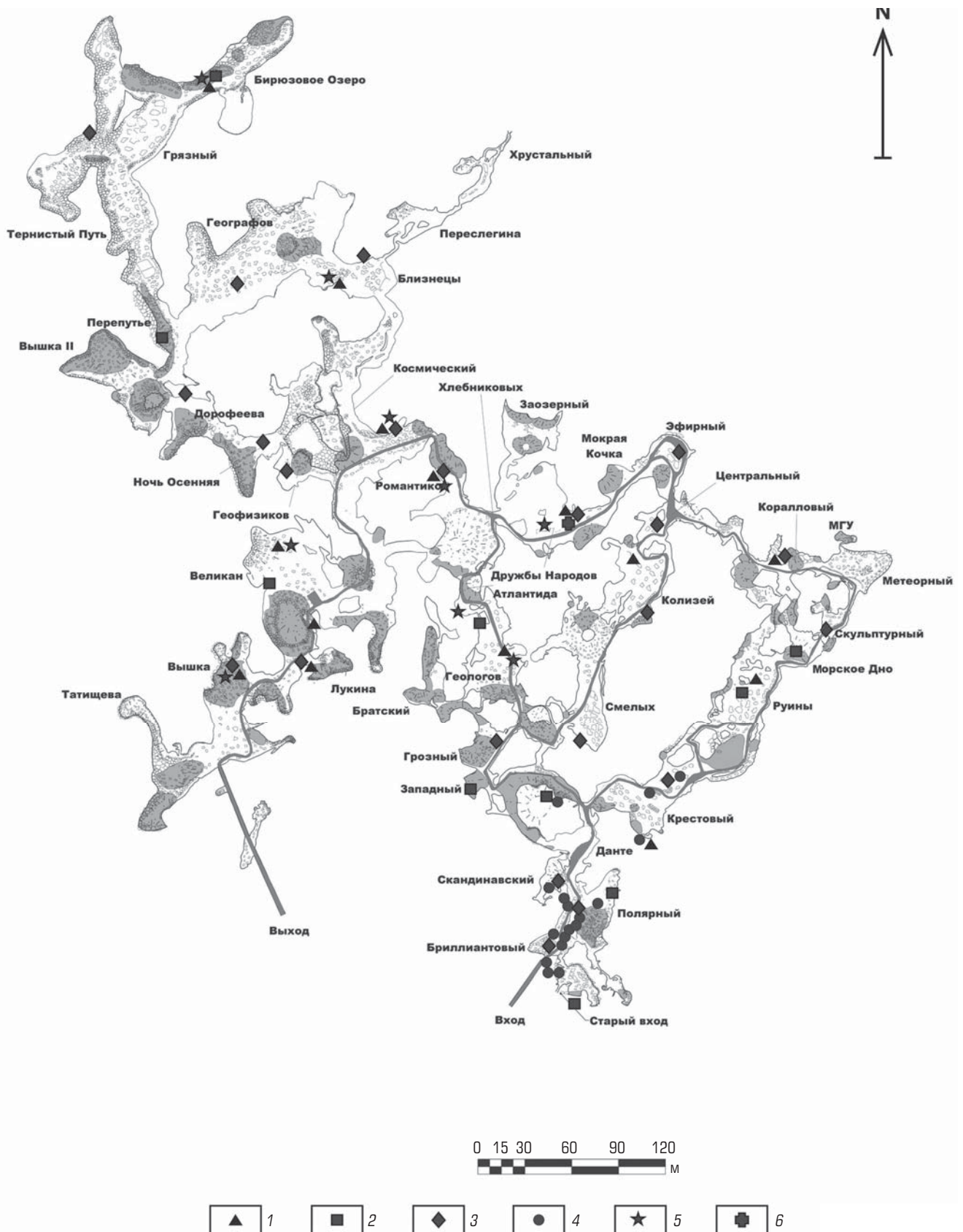


Рис. 1. Расположение наблюдательных постов в Кунгурской Ледяной пещере. Мониторинг:
 1 – гидрогеологический; 2 – микроклиматический (логгеры); 3 – микроклиматический (термометры);
 4 – гляциологический; 5 – гидрохимический; 6 – датчик CO₂

Для уточнения морфометрических показателей пещеры Е. П. Дорофеев в 1964 г. составил первый инструментальный план [8], который пополнялся результатами съемок пещерных ходов и галерей за период с 1965 по 2018 г., благодаря чему основные морфометрические показатели пещеры возросли. Протяженность Кунгурской Ледяной пещеры увеличилась с 5600 до 6525 м, общая площадь – с 52 тыс. до 76 тыс. м² и объем с 150 тыс. до 267 тыс. м³.

Гроты и галереи были совмещены с планом земной поверхности массива [8], повторное составление плана осуществляют в рамках мониторинга с периодичностью в 15–20 лет. Сравнительный анализ съемочного материала позволяет установить проседание земной поверхности над гротами и места возникновения карстовых провалов на Ледяной горе. С 1948 г. сотрудниками стационара на Ледяной горе зафиксированы 97 провалов и 230 просадок.

Гидрогеологический и гидрохимический мониторинг

Система гидрологического мониторинга пещеры включает в себя замеры уровня воды в озерах пещеры, искусственных водопунктах – шурфах и скважинах (гроты Крестовый, Коралловый, Руины), скважине у пещеры и в р. Сылве. Уровни воды начали измерять в 1930-е годы по установленным водомерным рейкам, которые были привязаны к абсолютным отметкам только в 1973 г.

С 1950-х годов начаты наблюдения за динамикой изменения уровня воды в р. Сылва. В 1975 г. близ Кунгурской Ледяной пещеры оборудован гидрометрический пост, наблюдения на котором проводились по 1987 г. [9]. В 2002 г. был оборудован свайный гидропост, с этого периода наблюдения за изменением уровня воды в реке не прерывались.

В результате продолжительных наблюдений установлено, что режим карстовых вод в пещере в значительной степени определяется режимом питающих их вод. Максимальный уровень воды устанавливается в период весеннего паводка, минимальный – летом и зимой. На р. Сылве максимальная высота уровня воды устанавливалась в 1979, 1987, 1998 и 2016 гг., уровень поднимался на 7,86; 7,46; 7,44 и 6,3 м над меженью соответственно. В 1979 г. это привело к затоплению входовой части пещеры и разрушению ледяного убранства. В остальные годы высоких паводков (1987, 1998 и 2016 гг.) в связи с укреплением системы защитных дамб речные воды не приводили к таким последствиям, но часть пещеры все же подтапливалась. Минимальный уровень в реке за весь период наблюдений устанавливался в сентябре 1949 г. и декабре 2017 г. и составил 111,27 и 111,56 м соответственно. Минимальный уровень воды в пещере зафиксирован в гроте Лукина в ноябре 2009 г. (110,56 м) и марте 2010 г. (110,54 м).

За время мониторинговых наблюдений были проведены следующие эксперименты: определение направления и скорости подземных водотоков, изучение скорости растворения сульфатных пород в лабораторных и естественных условиях [10–13]. Установлено, что неоднократное изменение направления и скоро-

сти движения карстовых вод и их связь с речными водами является основным фактором активизации карста.

Гидрогеологический мониторинг позволяет выявить особенности, закономерности и интенсивность развития карста в условиях различного литологического состава горных пород, происхождение поверхностных и подземных карстовых форм.

Впервые химические анализы воды в озерах Кунгурской Ледяной пещеры были выполнены в 1934 г. С 1966 г. отбор проб на химический состав расширился, изучали состав не только озер, но и атмосферных осадков, временных озер в суффозионно-карстовых воронках на поверхности Ледяной горы и капели в пещере. Всего было выполнено 2390 анализов.

Вода в пещере сульфатно-кальциевого состава имеет минерализацию от 2,1 до 2,5 г/л, средняя жесткость воды составляет 27,74 мг-экв/л.

Многолетний период наблюдений позволяет сделать вывод, что воды Кунгурской Ледяной пещеры сохраняют свой состав, несмотря на влияние антропогенных и природных факторов. Все загрязняющие компоненты – в пределах нормы (за исключением показателя минерализации и количества сульфатов), бактериологическое загрязнение отсутствует.

С 2017 г. начаты исследования изотопного состава природных вод в районе пещеры. В результате будет установлено зональное распределение изотопного состава водорода и кислорода в поверхностных и подземных водах, можно будет проследить изменение изотопного и химического состава, что позволит в дальнейшем спрогнозировать процессы выноса вещества из карстового массива.

Качество водных объектов в пещере соответствует нормативным показателям. Постоянно действующий контроль за качеством воды позволяет следить за его изменением и вовремя предпринять необходимые меры. Исследования послужили одним из оснований для принятия решения о закрытии городской свалки на Ледяной горе.

Микроклиматический мониторинг

Микроклиматический мониторинг включает в себя регулярные наблюдения за температурой воздуха и воды, горных пород, влажностью, газовым составом воздуха как в пещере, так и на поверхности карстового массива.

Первые измерения температуры воздуха на поверхности и в пещере произвел в 1733 г. профессор Петербургской академии наук И. Г. Гмелин. Представленные данные в его рукописи являются одними из первых в мире наблюдений за климатическими параметрами в карстовых полостях.

Первые метеорологические посты в пещере были оборудованы в 1934 г. сотрудниками партии Гидростройпроекта, а в 1948 г. метеорологические наблюдения в тех же точках продолжали сотрудники Кунгурского стационара.

В Кунгурской Ледяной пещере выделены три микроклиматические зоны: зона постоянных отрицательных температур, переходная и нейтральная зоны. Детальное изучение воздушных потоков, распределения температур и влажности воздуха позволи-



Рис. 2. Изменение границы распространения сезонного оледенения в Кунгурской Ледяной пещере в зимний период с 1967 по 2017 г.

ло установить причины потепления в различные периоды (1948, 1979, 1998 гг.) и предпринять меры для пополнения холода в зоне постоянных отрицательных температур. Минимальная температура воздуха за весь период наблюдений ($-32\text{ }^{\circ}\text{C}$) зафиксирована в 1969 г. в гроте Бриллиантовый, максимальная ($6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) – в гроте Бирюзовое Озеро в 2014 г.

Температура воды на протяжении многолетних наблюдений за ее колебаниями в гротах была незначительная. Абсолютный минимум был отмечен в 1983 г. в гроте Крестовый ($-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), максимум ($5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) – в 1950 г. в гроте Дружбы Народов.

Исследования газового состава и обследования радиационной обстановки проводят один раз в три года. Основными компонентами воздуха в Кунгурской Ледяной пещере являются азот, кислород и углекислый газ. Концентрация CO_2 варьируется в пределах 224–1485 ppm и приближается к предельно допустимым отметкам, поэтому этот основной компонент необходимо контролировать. Сезонные измерения CO_2 показали, что прежде всего концентрация газа зависит от изменения температуры в гротах, максимум содержания CO_2 приурочен к летнему периоду [14].

Максимальная радиоактивность в Кунгурской Ледяной пещере наблюдается в гроте Великан (до 44 мкР/ч), причиной повышения фона является присутствие в воздухе дочерних продуктов радона. Для экскурсантов посещение пещеры безопасно.

Гляциологический мониторинг

Наблюдения за оледенением в пещере начаты в 1948 г., после того как был оборудован входной тоннель в грот Бриллиантовый. В результате проходки тоннеля изменилось направление и скорости воздушных потоков, уменьшилась мощность оледенения и число сублимационных кристаллов. Снежно-ледяные образования являются основной достопримечательностью пещеры. Гляциологические наблюдения и восстановление ледяных образований начаты В. С. Лукиным, после 1969 г. продолжены Е. П. Дорофеевым, который дал наиболее полное описание всех видов льда в пещере. За время наблюдений были установлены причины возникновения и условия сохранения оледенения в зоне отрицательной температурной аномалии. Границы распространения оледенения менялись в зависимости от температуры воздуха на поверхности и изменения системы проветривания (рис. 2).

С момента освоения и благоустройства пещеры мощность оледенения стала зависеть не только от естественных, но и от технических и антропогенных условий [15]. Прежде всего это изменение температуры наружного воздуха, ежегодный подъем подземных и поверхностных вод (р. Сылвы), сооружение входного и выходного тоннелей, искусственное проветривание и др. Все эти факторы влияют на воздушные и тепловые потоки, изменяют динамику таяния или нарастания льда. Таким образом, с момента


образования Кунгурской лаборатории в пещере была проведена большая работа для восстановления и сохранения оледенения.

Заключение

Постоянные геологические наблюдения позволяют выделять различные процессы и факторы, влияющие на сохранность пещеры и возможность ее безопасной эксплуатации, осуществлять прогноз и контроль над ними. Проведение гидрогеологического и гидрохимического мониторинга дает возможность анализировать состояние и процессы, происходящие в водных объектах пещеры, и вовремя выявлять источники загрязнения. Зафиксированные, закономерно повторяющиеся изменения параметров гидрологического режима в пространстве и во времени позволяют прогнозировать негативные последствия для экскурсионного использования пещеры. Регулярные наблюдения за климатическими усло-

виями, влажностью и газовым составом в течение длительного времени позволяют корректировать и контролировать естественный микроклиматический режим пещеры, а также скорость развития геологических процессов. С помощью гляциологического мониторинга можно проследить динамику развития снежных и ледяных образований. Таким образом, несмотря на увеличение различных негативных факторов, влияющих на все компоненты карстового массива, многолетние наблюдения помогают сохранить естественное состояние пещеры в условиях длительной эксплуатации и возрастания туристического потока.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 6, pp. 60–64
DOI: 10.17580/gzh.2018.06.13

Multi-profile monitoring in the Kungur Ice Cave

Information about authors

A. V. Krasikov¹, Engineer, Post-Graduate Student, alexeykrasikov55@gmail.com

A. S. Kazantseva¹, Engineer, Post-Graduate Student

M. V. Bogomaz¹, Engineer, Post-Graduate Student

¹ Mining Institute, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract

The Kungur Ice Cave is the single cave in Russia and one of the few caves in the world where monitoring observations have been conducted for 70 years. It brings her in the status of a unique natural object which has to be considered as a standard of studying karst processes in carbonaceous and sulfate massifs. The variety of microclimatic situations and existence of a set of types of ice emphasize the significance of preservation of the Kungur Ice Cave and as natural monument. Overseeing of the processes in the cave is important for setting the most optimum mode of operation of the cave as the touristic site for 100 years. Today monitoring includes the following observations: geological, hydrogeological, geochemical, microclimatic, glaciological and surveying. For the long-term period of observation, the change of climatic parameters, morphometric characteristics, structure and quality of underground waters is revealed, and the dynamics of freezing in grottoes depending on season is studied.

The continuous monitoring reveals various processes and factors that have influence on the cave integrity and safety. Furthermore, it allows prediction and control of such processes and factors, analysis of condition and processes in water bodies in the cave, prompt detection of water pollution sources, forecast of negative consequences for guided tours to the cave, adjustment of natural microclimate and development of geological processes in the cave, as well as tracing the trend of snow cover and ice growth.

From the moment of initiation and expansion of the cave, these changes began to depend not only on natural, but also technical and anthropogenic conditions. Results of observations have great scientific and applied value.

Keywords: Kungur Ice Cave, Kungur laboratory hospital, monitoring observations, karst, karst rock mass, long-term changes, mode.

References

- Kadebskaya O. I. Geological condition of the Kungur Ice Cave and adjacent area, protection and efficient use : thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Geographical Sciences. Perm. 2004.
- Kungur Ice Cave. Russia. Feel the Planet. 2016. Available at: <https://feel-planet.com/kungur-ice-cave-russia> (accessed: 6.06.2018).
- Malyudov B. R., Kadebskaya O. I. Ice caves in Russia. *Ice Caves*. 2018. pp. 529–610.
- Naumkin D. V., Lavrov V. N. 70 years on service in science and culture. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 5. pp. 97–100.
- Maksimovich G. A. Underground laboratories. *Caves : Interuniversity Collection of Scientific Transactions*. Perm. 1972. Iss. 12–13. pp. 186–190.
- Kovaleva T. G. Karst risk assessment in the Kungur town area based on the general geological approach. *Vestnik Permskogo universiteta. Geolgiya*. 2016. No. 4(33). pp. 18–25.
- Krasikov A. V., Trapeznikov D. E., Kadebskaya O. I. Roof stability analysis and estimation in grottoes of the Kungur Ice Cave. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii : Nauchnye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo*. 2016. No. 19. pp. 362–371.
- Dorofeev E. P. New Survey of the Kungur Cave Plan: Report. Kungur. 1964. 110 p.
- Dublyansky V. N. The Kungur Ice Cave: Experience of Monitoring Investigations. Yekaterinburg : UrO RAN. 2005 375 p.
- Gorbunov K. A., Dorofeev E. P., Maksimovich N. G., Minkevich I. I. Investigation of dissolution of gypsum and anhydrite in the Kungur Cave. *Caves : Interuniversity Collection of Scientific Transactions*. Perm. 1986. Iss. 20. pp. 39–47.
- Gorbunov K. A., Dorofeev E. P., Minkevich I. I. In situ research into dissolution of gypsum and anhydrite in the Kungur Cave. *Minerals and Deposits in Caves and Their Practical Significance : Abstracts of Papers*. Perm. 1980. pp. 53–54.
- Kazantseva A. S. Dissolution of sulfate rocks by groundwater in the Kungur Ice Cave. *Caves : Interuniversity Collection of Scientific Transactions*. Perm. 2014. Iss. 37. pp. 9–15.
- Beltyukova V. D. Groundwater dynamics in the Kungur Ice Cave during summer rainfall runoff in 2015. *Geology in the Developing World : Collection of Scientific Papers*. Perm. 2016. Vol. 2, pp. 346–348.
- Kazantseva A. S., Krasikov A. V. Seasonal variations in gas composition of air in the Kungur Ice cave. *Vestnik Gornogo instituta Uro RAN*. 2017. No. 2 (67). pp. 33–37.
- Lavrova N. V. Dynamics of freezing in the Kungur Ice Cave in 2011–2015. *Caves : Interuniversity Collection of Scientific Transactions*. Perm. 2016. Vol. 39. pp. 56–61.