

## ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.44

**А.С. Казанцева<sup>1</sup>, О.И. Кадебская<sup>1,2</sup>**  
**ДИНАМИКА ОЛЕДЕНЕНИЯ В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ\***<sup>1</sup>*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Кунгур*<sup>2</sup>*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

Динамика оледенения пещер на сегодняшний день изучена слабо в связи с трудоемкостью работ в карстовых полостях, а также отсутствием продолжительных рядов наблюдений. На территории России исключением является лишь Кунгурская Ледяная пещера, где с 1948 г. проводились многолетние режимные наблюдения. Последние 30 лет микроклиматические наблюдения дополнены детальными исследованиями аккумуляции и абляции льда в пещере балансовым методом. В данной статье отражены результаты проведенных мониторинговых наблюдений с 1985 по 2016 г. Анализ представленных данных позволил определить вариации величины абляции и установить причины таяния льда.

На основе наблюдений были разработаны сезонные режимы проветривания, при которых происходят накопление и сохранение многолетнего льда в пещере. Выявлено, что, несмотря на приток тепла за счет посетителей и осветительного оборудования, а также негативных естественных факторов для сохранения льда – повышение среднегодовых температур и среднесезонных отрицательных температур на поверхности, соблюдение этих режимов проветривания на протяжении последних 15 лет позволило увеличить площадь оледенения до максимально возможных размеров.

Ключевые слова: пещера, оледенение, сублимация, абляция, температура воздуха, мониторинг.

**A. S. Kazantseva<sup>1</sup>, O. I. Kadebskaya<sup>1,2</sup>**  
**DINAMIC OF A GLACIATION IN THE KUNGUR ICE CAVE**<sup>1</sup>*Mining Institute, UB RAS, Kungur*<sup>2</sup>*Perm State University, Perm*

Today the dynamics of caves glaciation is studied poorly because of high complexity of work in karst cavities and also due to the lack of long series of observations. In the territory of Russia, an exception is only the Kungur Ice Cave, where long-term regime observations have been performed since 1948. Over the past 30 years, microclimatic observations have been supplemented with detailed studies of the accumulation and ablation of ice in the cave by the balance method. The paper presents results of the monitoring observations from 1985 to 2016. The analysis of the submitted data has allowed us to define variations in the ablation size and to establish the reasons for ice thawing.

The observations served as the basis for developing seasonal modes of airing at which there is accumulation and preservation of long-term ice in the cave. It has been revealed that, despite the introduction of heat due to visitors and lighting equipment, as well as negative natural factors for the preservation of ice – an increase in the average temperature and average seasonal negative surface temperatures, compliance with these ventilation modes over the last 15 years has enabled increase in the glaciation area to the maximum possible size.

Key words: cave, glaciation, sublimation, ablation, air temperature, monitoring.

doi 10.17072/2079-7877-2017-4-5-11

Лед в пещерах не только сохраняет информацию о климатических изменениях на поверхности на протяжении длительного времени, но и изменяет воздушный и водный режимы карстовых массивов, а также влияет на устойчивость горных пород. Поэтому вопросами изучения подземных наледей занимаются не только гляциологи, но и специалисты из других областей науки: геологи, спелеологи, палеогеографы, палеонтологи, минералоги и даже биологи. Наибольший интерес для науки вызывают пещеры с наледями, где существует большое разнообразие микроклиматических обстановок, что позволяет наблюдать за процессами роста, таяния и испарения льда как во времени, так и одновременно в разных гротах, где различны температурные и влажностные условия. Вопросы сохранения мощности льда и постоянства границы распространения оледенения в Кунгурской Ледяной пещере поднимались с начала ее хозяйственного и экскурсионного освоения не только из-за привлекательности ледяного убранства, но и с позиций безопасности проведения экскурсий. Поэтому уже с 1948 г. в пещере стали проводиться многолетние режимные наблюдения за изменением состояния оледенения.

На сегодняшний день Кунгурская Ледяная пещера (КЛП) является единственной пещерой России, где на протяжении 70-летнего периода проводятся мониторинговые наблюдения за всеми компонентами подземного ландшафта. История наблюдений за динамикой оледенения в Кунгурской Ледяной пещере детально представлена Б.Р. Мавлюдовым [5]. Обобщение данных показало, что оледенение пещеры с момента ее благоустройства стало зависеть от искусственного проветривания, а для того, чтобы сохранить пещеру и количество льда в неизменном виде, необходимо более качественно контролировать температурный режим и динамику оледенения во всех гротах. Для этого с 1985 по 1992 г. исследования динамики оледенения начали проводиться при помощи балансового и микроклиматического методов Б.Р. Мавлюдовым и Е.П. Дорофеевым, а с 2000 г. по настоящее время О.И. Кадебской. В многолетних наледях пещеры были установлены репера, по которым 1 раз в месяц проводились замеры. К сожалению, с 1992 по 1999 г. за замерными рейками никто не следил, многие были утрачены из-за таяния льда или обвалов в пещере. С ноября 1999 г. наблюдения были восстановлены. С 2000 г. дополнительно проводились описание и фотофиксация ледяных образований во время максимального (зима) и минимального (лето) оледенения. Описание проводилось в свободной форме: указывались наличие в гроте форм льда, размеры и площади оледенения.

Накопленные данные более чем 30-летний период наблюдений позволили авторам провести более точную оценку изменений баланса массы многолетнего льда в пещере.

Накопление льда в Кунгурской Ледяной пещере происходит в привходовой части, где с поверхности через вертикальные расщелины и каналы проникают атмосферные и талые воды, а также за счет конденсационной влаги. Основную массу снежно-ледяных образований Кунгурской Ледяной пещеры составляют конжеляционные льды (98%) [2]. Покровные наледы, сталактиты и сталагмиты обычно формируются под органическими трубами и трещинами. Если вход иногда расчищался ото льда и глыб, то вертикальные каналы на поверхности Ледяной горы всегда ограничивали активную циркуляцию воздуха в карстовом массиве. Лишь очень редкие события в истории пещеры – провалы резко меняли условия накопления холода. В первых гротах при быстром снеготаянии вода со склона или во время высоких паводков напрямую через трещины, горизонтально поступает в холодную часть пещеры, формируются небольшие озерца, которые в течение 1–2 месяцев замерзают. На формирование сублимационных кристаллов влияют температура воздуха, степень его пересыщения влагой, скорость поступления влаги, а также интенсивность отвода тепла от места сублимации.

Наименьшая площадь оледенения была зафиксирована в 1950, 1987 и 2002 гг., граница оледенения находилась в 200 м от бровки склона, а наибольшая площадь зафиксирована в зимний период 1967 г., граница оледенения проходила в 400 м от бровки склона. Самый дальний пункт пещеры, где по литературным данным в 1770 г. отмечено оледенение, – это грот Метеорный (рис. 1).

Для оценки объема многолетних ледяных отложений в феврале 2008 г. в пещере специалистами Горного института УрО РАН были проведены исследования с помощью георадара «Око-М1». Измерения осуществлялись в гротах с максимальной мощностью многолетнего льда, где закладывались поперечные профили, и в проходах, где оценивалась глубина простираения льда вглубь породы по трещинам. Наиболее тщательно была изучена наледь в гроте Полярный. Всего в гроте было проложено 4 профиля, в проходе Горе Толстякам и Высоким – 2 профиля, в проходе между гротами Бриллиантовый и Полярный – 2 профиля и в гроте Данте – 1 профиль. В результате проведенных исследований выявлено, что максимальная мощность многолетнего льда в гроте

Полярном – до 2 м, минимальная – 20 см. Глубина простираения льда вглубь породы по трещинам по всем точкам наблюдения превысила 6 м [7].

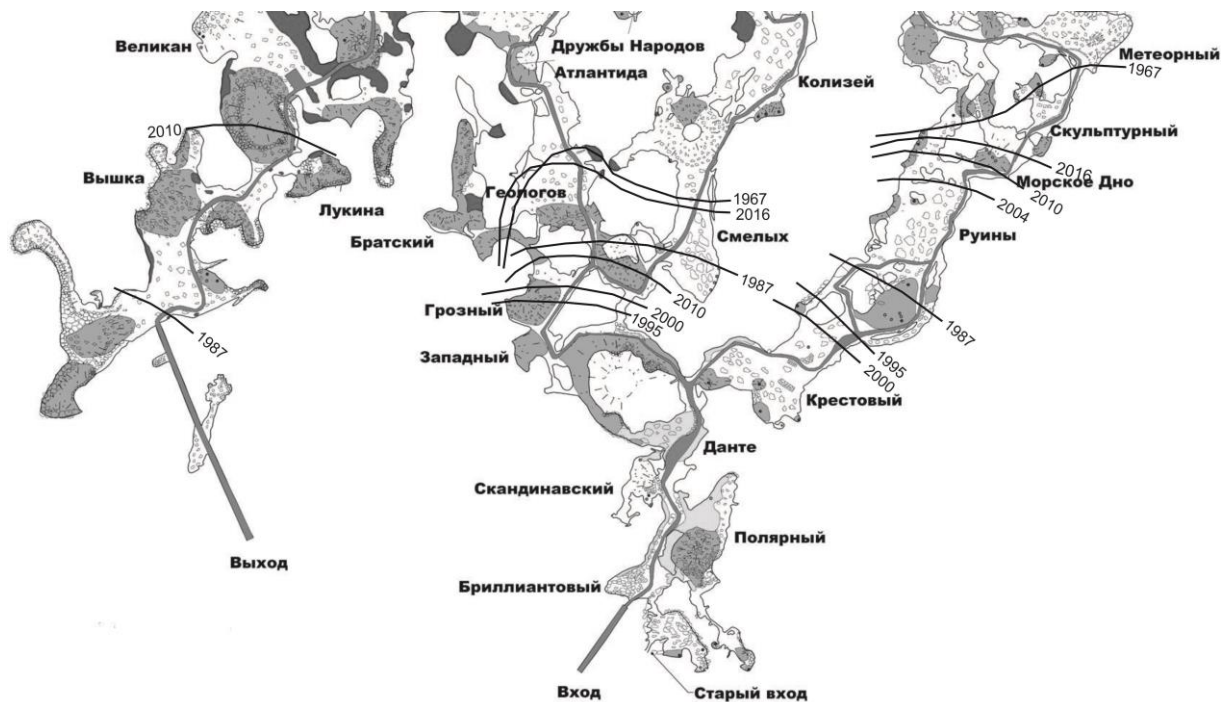


Рис. 1. Границы распространения оледенения в КПП в зимний период

Характер изменения масштабов оледенения пещер при изменении внешней температуры воздуха можно оценить по модельным расчетам. Непрерывная регистрация процессов аккумуляции и абляции льда в пещере в 1985–2016 гг. показала, что баланс массы льда в разных частях пещеры различен.

В гротах Бриллиантовый, Первый, проходе Бриллиантовый–Полярный, проходе Горе Толстякам и Высоким и гроте Данте расходная часть баланса определяется испарением льда, а таяние отсутствует из-за господствующих здесь отрицательных температур воздуха. Поэтому с 1985 по 2016 г. удельный баланс массы льда в этой части пещеры близок к нулю и равнялся  $0,05 \text{ г/см}^2$ , а интенсивность испарения за весь 30-летний период наблюдений составила от 3 до 30 см.

В гроте Полярный в период с 1987 по 2000 г. лед испарялся с той же скоростью, как и в гроте Бриллиантовый, но в связи с проведением дополнительного проветривания через входной тоннель с 2000 по 2005 г. произошло резкое накопление льда на осыпи между экскурсионной тропой и центральной частью грота. Лед заполнил пространство между сводом и осыпью, появившаяся ледяная перемычка стала препятствовать попаданию холодного воздуха в зимний период в центральную часть грота, вследствие этого среднегодовая температура в гроте стала повышаться, и многолетний лед стал таять. К 2015 г. в гроте льда не осталось (кроме перемычки между гротом и экскурсионной тропой). Зимой 2016 г. ледяная перемычка между тропой и гротом была разрушена, чтобы холодный воздух вновь стал поступать внутрь грота. В гроте восстановились отрицательные температуры и за год (2016–2017 гг.) прирост льда в центральной части грота составил от 30 до 70 см.

Следующий участок зоны с многолетним льдом – грот Крестовый. В гроте Крестовый с 1985 по 1986 г. прирост льда происходил за счет увеличения мощности наледи (150 мм за зиму). С 1987 по 2000 г. в гротах Крестовый и Скандинавский многолетний лед начал деградировать и к 2001 г. полностью растаял. Продолжительность периода таяния льда тогда ежегодно составляла 10 месяцев, среднегодовая температура воздуха в гроте в этот период составляла  $+0,5^\circ\text{C}$ , суммарное годовое таяние льда достигало 180–198 мм. Площадь распространения постоянного льда с 1960-х по 2000 гг. уменьшилась с  $1020 \text{ м}^2$  до  $530 \text{ м}^2$  [3].

В результате изменения системы проветривания зимой 2002–2003 гг. граница сезонного оледенения из грота Крестовый переместилась в грот Морское Дно. На сегодняшний день в гротах Скандинавский и Крестовый в течение 10–11 месяцев в году наблюдаются отрицательные температуры, происходит накопление натечного льда, мощность льда в пунктах наблюдения с 2001 по 2017 г. увеличилась с 0,1 до 1,7 м.

Максимум образования сублимационного льда приурочен к периоду минимальных температур внешнего воздуха, поступающего в пещеру (февраль-март). При резких похолоданиях все сечение пещерной галереи занимает поток сухого холодного воздуха, что приводит к испарению сублиматов. В зимнее время часто наблюдается осыпание сублимационных кристаллов, которые преобразуются в участки осадочно-метаморфического льда на полу (гроты Бриллиантовый и Полярный). В гроте Бриллиантовый проводились наблюдения интенсивности сублимации льда – изменения веса ледяного монолита, подвешенного на нити [5]. На основе измерений удалось оценить годовой объем накопления сублимационного льда (в пересчете на воду), составивший около 0,7 м<sup>3</sup>. Средняя интенсивность сублимации – 0,2 мм/сут. В гроте Первый сублимационные кристаллы не деградируют, мощность накопленного слоя на сегодняшний день составляет более 0,7 м. С 2001 г. по настоящее время во всех гротах пещеры в зоне отрицательной температурной аномалии идет период увеличения мощности оледенения.

С 1985 по 2016 г. среднегодовая температура воздуха на поверхности повысилась с 1,8°C до 2,9°C (рис. 2). Максимальная среднегодовая температура на поверхности зафиксирована в 2015 г. и составила 6,6°C, минимальная среднегодовая температура (0,4°C) зарегистрирована в 1986 г.

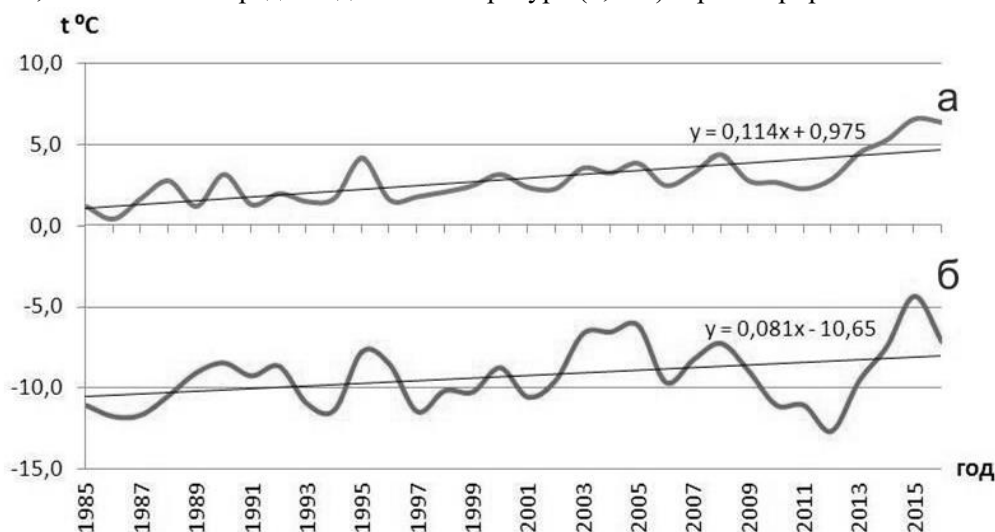


Рис. 2. Ход среднегодовых температур воздуха на поверхности (а) и ход средних температур в зимний период с отрицательными значениями (б), по данным метеостанции у входа в пещеру

Наиболее важным периодом для накопления холода в пещере является время, когда на поверхности наблюдаются температуры ниже 0°C. Максимальная среднесезонная температура в зимний период отмечена в 2015 г. (-4,4°C), минимальная – в 2012 г. (-12,7°C).

Таким образом, по представленным данным установлено, что в районе пещеры на поверхности с 1985 г. по настоящее время наблюдается повышение температуры воздуха, как в течение года, так и в зимний период, что является негативным фактором для поддержания и наращивания оледенения в пещере. На основании этого был сделан вывод о необходимости увеличения периода проветривания через естественный вход, а также создания дополнительного вентиляционного отверстия у входного тоннеля.

Оценка динамики накопления и абляции льда в гроте Крестовый с 1985 по 2016 г. показала, что наибольший вклад в абляцию вносит таяние ледяных образований при температурах выше 0°C и при влажности близкой к 100%. В целом за рассматриваемый период среднегодовая температура воздуха в гроте Крестовый понизилась на 0,9°C, что привело к накоплению льда в этой части пещеры (рис. 3).

Максимальная температура зафиксирована в 2000 г. (+1,5°C), минимальная – в период с 2006 по 2008 г. (-1,2°C). С 1991 по 1994, 1996, 1998 и 1999 г. измерения температуры воздуха в гроте Крестовый не проводились или имели неполный годовой ряд наблюдений.

Период с 1985 по 1994 гг. характеризуется повышением среднегодовой температуры воздуха на поверхности на 0,5°C (с 1,2 до 1,7°C), в этот же период в гроте Крестовый средняя температура воздуха повысилась с 0,3 до 1,1°C. Несмотря на общее повышение температур количество дней с температурами выше 0°C в гроте уменьшилось с 306 до 214 дней. Величина таяния снежно-ледяных образований из-за общего повышения температуры в гроте возросла к концу периода и составила 242 мм/год (рис. 4). Максимальная деградация льда в летний период наблюдалась в 1989 г. и

составляла 278 мм/год. Приведенные выше данные позволяют охарактеризовать данный период как этап с устойчивым повышением среднегодовых температур и величины таяния льда.

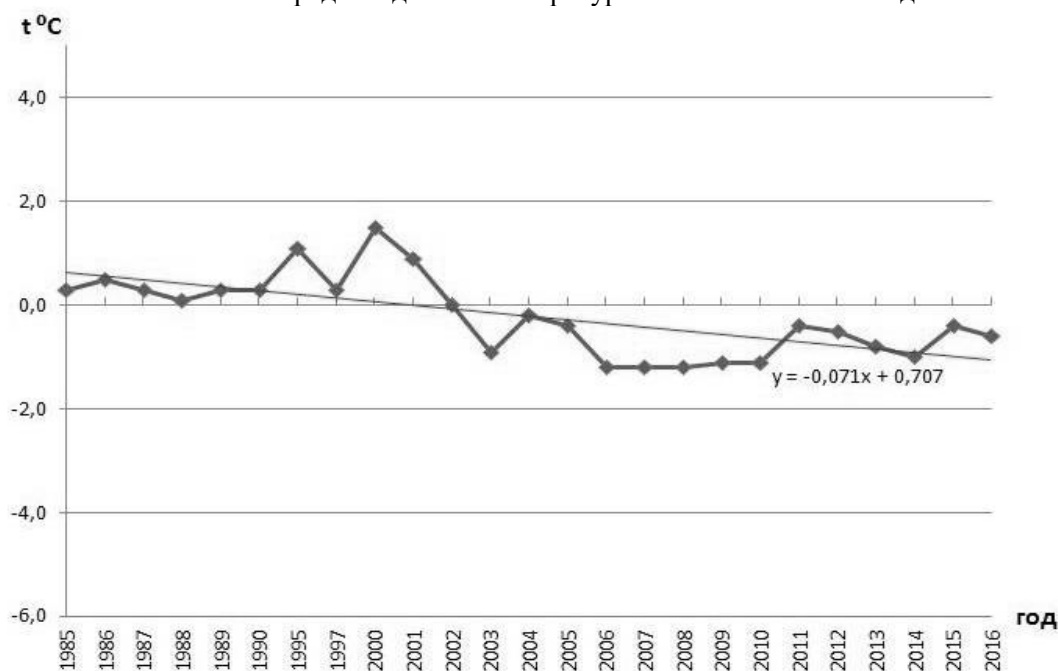


Рис. 3. Ход среднегодовых температур воздуха в гроте Крестовый

В период с 1994 по 2004 г. среднегодовая температура воздуха на поверхности повысилась с 1,7 до 3,3°C, а в 1995 г. среднегодовая температура воздуха была максимальной — +4,2°C. Несмотря на повышение среднегодовых температур в этот период в гроте Крестовый наблюдалось понижение среднегодовых температур на 1,3°C (с 1,1 до -0,2°C), теплый период сократился на 31 день и к 2004 г. составил 183 дня. В 2000 и 2001 гг. величина абляции составила 512 и 400 мм/год соответственно, причиной послужило полное прекращение вентиляции через естественный вход и входной тоннель в зимний период. После возобновления проветривания к 2004 г. суммарное годовое таяние в гроте Крестовый снизилось до 163 мм/год.

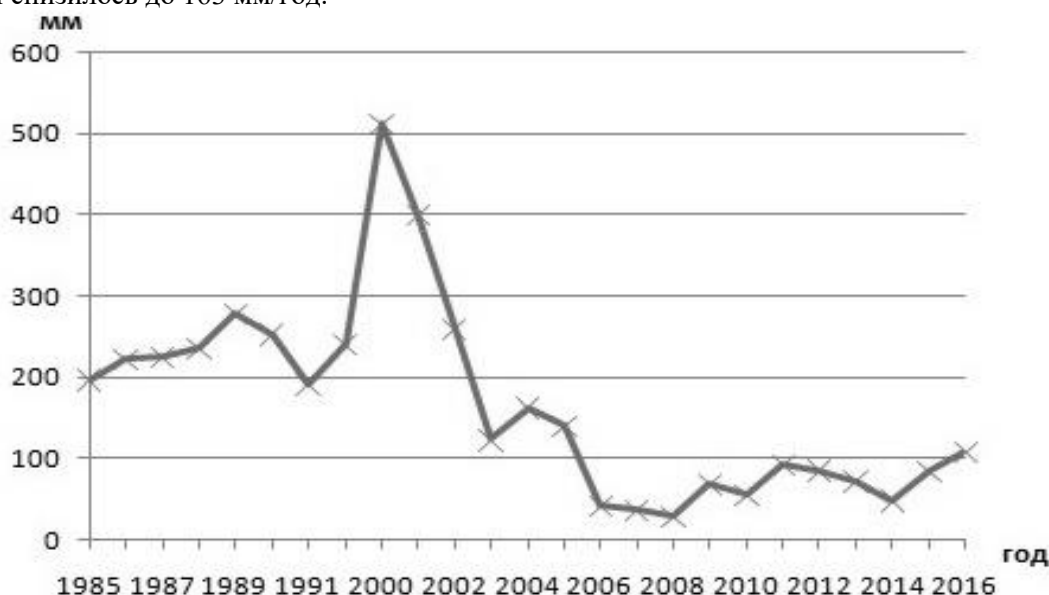


Рис. 4. Величина таяния льда в гроте Крестовый с 1985 по 2016 г.

В третий период (с 2004 г. по настоящее время) среднегодовая температура воздуха на поверхности повысилась на 3,1°C (с 3,3 до 6,4°C). Это привело к увеличению в гроте Крестовый количества теплых дней с 183 до 192. Благодаря дополнительному проветриванию в зимний период через входной тоннель среднегодовая температура воздуха в гроте понизилась с -0,2 до -0,6°C, что

привело к накоплению льда в этой части пещеры. Суммарное годовое таяние также снижалось: с 163 мм/год (2004 г.) до 108 мм/год (2016 г.), что также свидетельствует о правильном проведении работ по сохранению льда в пещере (рис. 4). В отдельные годы с наиболее холодным летом (2006–2008 гг.) величина таяния была минимальной и колебалась в пределах 29–69 мм/год. В 2016 г. наблюдалось аномально жаркое лето, вследствие чего температура воздуха как на поверхности, так и в гроте в это время была повышенной.

Таким образом, в период с 2004 г. по настоящее время, несмотря на общее повышение среднегодовых температур на поверхности, в пещере за счет проведения мероприятий по улучшению проветривания удавалось накапливать холод в зимние периоды и наращивать лед. Граница распространения сезонного оледенения увеличилась к 2016 г. и достигла грота Морское Дно.

В настоящее время наблюдается период восстановления и увеличения мощности оледенения во всех гротах пещеры в зоне отрицательной температурной аномалии. С 1985 по 2016 г. среднегодовая температура воздуха на поверхности увеличилась на 0,9°C (с 1,8 до 2,9°C). Минимальная среднегодовая температура воздуха составила 0,4°C в 1986 г., максимальная среднегодовая температура (6,6°C) была зафиксирована в 2015 г. Наиболее длительный холодный период (с температурами ниже 0°C) наблюдался в 1996 г. и составил 181 день, самый короткий холодный период зафиксирован в 2002 г. (140 дней). Несмотря на повышение среднегодовой температуры воздуха на поверхности в пещере благодаря проведенным мероприятиям по сохранению льда прослеживалось увеличение периода с отрицательными температурами. Граница максимального оледенения в 2016 г. достигла грота Морское Дно (350 м от входа в пещеру). Площадь многолетнего оледенения составила 850 м<sup>2</sup>.

В гроте Крестовый отмечен отрицательный тренд по многолетним климатическим показателям, что позволило восстановить утраченное оледенение в гроте. С 1985 по 2016 г. температура в гроте понизилась на 0,9°C. Максимальная среднегодовая температура 1,5°C была зафиксирована в 2000 г., за счет мероприятий по улучшению проветривания среднегодовая температура достигла минимума в период с 2006 по 2008 гг. (–1,2°C). В 2016 г. среднегодовая температура в гроте составила –0,6°C.

Таким образом, 30-летний период наблюдений за динамикой оледенения в Кунгурской Ледяной пещере, несмотря на экскурсионную нагрузку и повышение температуры воздуха на поверхности, позволил разработать особые режимы проветривания и установить благоприятные условия накопления льда в пещере.

#### Библиографический список

1. Дорوفеев Е.П. Изменение температурного режима Кунгурской пещеры в период ее эксплуатации и мероприятия по сохранению ледяных образований // Исследование карстовых пещер в целях использования их в качестве экскурсионных объектов. Тбилиси, 1978. С. 117–118.
2. Дублянский В.Н. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. С. 294–307.
3. Кадебская О.И. Геоэкологическое состояние Кунгурской Ледяной пещеры и прилегающей территории, ее охрана и рациональное использование: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2004. 28 с.
4. Лепехин И.И. Дневные записки путешествия доктора и Академии Наук адъюнкта Ивана Лепехина по разным провинциям Российского государства в 1770 году. СПб: Тип. Императорской Академии Наук, 1772. Т. 2. С. 225–235.
5. Мавлюдов Б.Р. Оледенение пещер. М.: Институт географии РАН, 2008. 290 с.
6. Ремезов С.У. Краткая Служебная чертежная книга // Сибирская летопись (Кунгурская). 1880. Т.4.
7. Степанов Ю.И., Кадебская О.И. Опыт изучения многолетнего льда в Кунгурской Ледяной пещере при помощи георадара // Пещеры. Пермь, 2001. Вып. 34. С. 55–59.

#### References

1. Dorofeev, E.P. (1978), "Change of temperature condition of the Kungur cave during her operation and an action for preservation of ice formations". Tezisi dokladov Vsesoyuznogo soveschaniya "Theses of reports of the All-Union meeting "Research of karst caves for their use as touristic sites", Tbilisi, 1978, pp. 117–118.
2. Dublyanskii, V.N. (2005), *Kungurskaya Ledyanaya peschera: opit rejimnih nablyudenii* [Kungur Ice cave: experience of regime observations], UrO RAN, Ekaterinburg, Russia.

3. Kadebskaya, O.I. (2004), "Geological condition of the Kungur Ice cave and adjacent territory, her protection and rational use". Ph.D. Thesis, Geography, PSU, Perm, Russia.
4. Lepelin, I.I. (1772), *Dnevnie zapiski puteshestviya doktora i Akademii Nauk adyunkta Ivana Lepelina po raznim provinciym Rossiiskogo gosudarstva v 1770 godu* [Day notes of a travel of the doctor and Academy of Sciences of the graduated in a military academy Ivan Lepyokhin on different provinces of the Russian state in 1770], vol.2, St-Petersburg, Russia.
5. Mavlyudov, B.R. (2008), *Oledeniye pescher* [Caves glaciation], Moscow, Russia.
6. Remezov, S.U. (1880), "Short Office drawing book", *Siberian chronicle (Kungur)*, vol 4.
7. Stepanov, Yu.I. and Kadebskaya, O.I. (2001), "Experience of studying of long-term ice in the Kungur Ice cave by means of the georadar", *Collection of scientific works of the PSNRU "Caves"*, Perm, Russia, pp. 55–59.

Поступила в редакцию: 28.03.2017

### Сведения об авторах

#### Казанцева Алена Сергеевна

инженер Кунгурской лаборатории-стационара  
Горного института Уральского отделения  
Российской академии наук;  
Россия, 617472, г. Кунгур, ул. Академии наук, 1;  
e-mail: kazantseva666@mail.ru

### About the authors

#### Alena S. Kazantseva

Engineer of the Kungur laboratory, Mining Institute  
of the Ural Branch of RAS.  
1, Akademii nauk st., Kungur, 617472, Russia;

#### Кадебская Ольга Ивановна

кандидат географических наук, заведующая  
Кунгурской лабораторией-стационаром  
Горного института Уральского отделения  
Российской академии наук, доцент кафедры  
туризма Пермского государственного  
национального исследовательского  
университета;  
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15;

#### Olga I. Kadebskaya

Candidate of Geographical Sciences, Head of the  
Kungur laboratory, Mining Institute of Ural Branch of  
RAS, Associate Professor, Department of Tourism,  
Faculty of Geography, Perm State University;  
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia;

e-mail: icecave@bk.ru

### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Казанцева А.С., Кадебская О.И. Динамика оледенения в Кунгурской Ледяной пещере // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. №4(43). С.5–11. doi 10.17072/2079-7877-2017-4-5-11

### Please cite this article in English as:

Kazantseva A. S., Kadebskaya O. I. Dynamics of a glaciation in the Kungur Ice Cave // Geographical bulletin. 2017. №4(43). P. 5–11. doi 10.17072/2079-7877-2017-4-5-11