

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ (ПРЕДУРАЛЬЕ)

© 2023 г. Н. В. Лаврова*

Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

**E-mail: nlavrova08@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 02.06.2023 г.

Представлены результаты спектральных анализов инфильтрационных отложений крупной карстовой системы в карбонатно-сульфатных отложениях. Перемещение рыхлого материала с поверхности по деформационным зонам в пределах массива мощностью 80–90 м приводит к скоплениям древесно-глинистых отложений в нижней части гротов и галерей. Локализация отложений приурочена к определенным формам подземного карстового рельефа – органным трубам – вертикальным структурам высотой до 20–25 м, свободных либо заполненных обломками. Выявлены закономерности в распределении отдельных оксидов и элементов, их значения сопоставлены с остаточными отложениями, а также породами матрикса. Инфильтрационные воды, поступающие в карстовый массив в допалеогенный этап, определяли условия формирования криогенных минералов при промерзании пород. Цикличность поступления материала сопоставлена с периодами позднплейстоценовых климатических событий.

Ключевые слова: инфильтрационные отложения, карстовая система, органные трубы, криогенез, Кунгурская Ледяная пещера, поздний плейстоцен, климатические ритмы
DOI: 10.31857/S0869607123010056, **EDN:** HCPSRZ

ВВЕДЕНИЕ

Карст является одним из ведущих процессов разрушения и преобразования растворимых пород различного состава. При этом образуются новейшие континентальные отложения как на поверхности, так и внутри скальных массивов карстующихся пород. В базовых и частных классификациях пещерных отложений выделяются обвальные, остаточные, химические, инфильтрационные и т.д. Как правило, определение инфильтрационных отложений в карстовых пустотах затруднено в силу большого сходства их с остаточными отложениями. Редкую возможность для изучения состава инфильтрационных отложений предоставляет Кунгурская пещера, где эти отложения формируются под органными трубами, через которые происходит периодическое поступление поверхностных (талых и дождевых) вод (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Кунгурская Ледяная пещера в Предуралье является эталонной карстовой полостью в карбонатно-сульфатных отложениях [7]. Разрез Ледяной горы, в недрах которой развита лабиринтовая спелеосистема с общей длиной ходов почти 6 км, представлен чередованием карбонатных пачек мощностью 5–10 м и сульфатных пачек мощностью



Рис. 1. Местоположение Кунгурской Ледяной пещеры.

Fig. 1. Location of the Kungur Ice Cave.

20–25 м иренского горизонта кунгурского яруса пермской системы. Гроты и галереи развиты в пределах нижней сульфатной ледяно-пещерской пачки мощностью 25 м (рис. 2).

Среди форм подземного ландшафта выделяются вертикальные органые трубы, которых в настоящее время зафиксировано 146. Форма их в плане варьирует от круглой или овальной до извилистой сложной. Поперечник составляет 1–10 м, высота до 20 м. Подавляющая часть органых труб “упирается” в плоские плиты карбонатных пород неволинской пачки на высоте 20–25 м. Отдельные трубы не доходят до неволинских доломитов и вскрывают верхние слои сульфатных отложений ледяно-пещерской пачки. В этом случае органые трубы имеют меньшие размеры – поперечник 1–3 м, высота не более 5 м. Своды округлые, что свидетельствует о напорной модели их формирования. Последнее подтверждается фрагментами сохранившихся извилистых подводящих каналов в устьях органых труб высотой до 1 м, образующихся при восходящем движении подземных вод (рис. 3).

Органые трубы делятся на открытые и закрытые. Закрытые органые трубы полностью заполнены обломочным материалом карбонатных пород. Под открытыми трубами, как правило, образуются осыпи, состоящие из хаотично нагроможденных обломков известняка и доломита с глинистым заполнителем. Но встречаются исключения. Осенью 2022 г. в Кунгурской пещере в отдельных гротах проведены расчистки

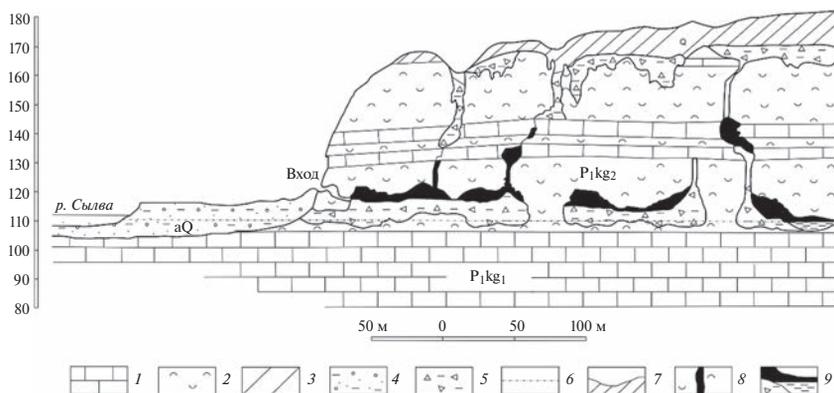


Рис. 2. Схематический разрез Ледяной горы и Кунгурской пещеры [2]. 1 – известняки и доломиты; 2 – гипсы и ангидриты; 3 – глинистые отложения; 4 – песчано-глинистые отложения; 5 – крупнообломочные отложения; 6 – уровень подземных вод; 7 – карстовые воронки; 8 – вертикальные каналы, трубы; 9 – подземные пустоты.

Fig. 2. Schematic section of the Ice Mountain and the Kungur cave [2]. 1 – limestones and dolomites; 2 – gypsum and anhydrites; 3 – clay deposits; 4 – sandy-clay deposits; 5 – coarse-grained deposits; 6 – groundwater level; 7 – sinkholes; 8 – vertical channels, pipes; 9 – underground voids.

осыпей. В гроте Колизей верхняя часть осыпи высотой 6 м (поперечник 15 м) состоит из щебня гипса и доломита с глинистым заполнителем. В основании осыпи – щебень гипса. Шурф глубиной 1.0 м пройден в средней части. В геологическом разрезе выделяются 3 ненарушенных слоя глины коричневой влажной пластичной мощностью 15–20 см, разделенных двумя маломощными (1–2 см) прослоями светло-коричневой глины. Угол падения слоев 40° – 45° . В гротах Дружбы Народов и Шапка Мономаха в осыпях также выделяются прослой глины, но менее отчетливые. Для сравнения пройден шурф в гроте Центральный в остаточных отложениях, сформировавшихся далеко за пределами высыпания обломочного материала их органичных труб.

Отобраны образцы алевритово-глинистого материала для валового (силикатного) анализа (рис. 4). Слои 1–3 рассматриваются как инфильтрационные отложения, слой 4 – дезинтегрированные растворимые карбонатно-сульфатные отложения. Геохимические исследования инфильтрационных и остаточных отложений проведены в Секторе наноминералогии ПГНИУ флуоресцентным рентгеноспектральным методом (аналитик И.В. Бадьянова).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химический анализ показал определенные закономерности распределения оксидов в инфильтрационных отложениях, результаты которого представлены на рис. 5. Отмечается значительная разница в содержании оксидов в привнесенных и дезинтегрированных отложениях в основании осыпи под органичной трубой – 2–3 раза. Для инфильтрационных образований в слоях 1–3 определяется постепенное синхронное увеличение двуоксида кремния SiO_2 , оксида титана TiO_2 и оксида алюминия Al_2O_3 , а также уменьшение CaO и MgO . Содержание оксидов в остаточных отложениях аналогично содержанию оксидов в инфильтрационных отложениях.

Представление о водной миграции химических элементов в инфильтрационных отложениях представлено на рис. 6.

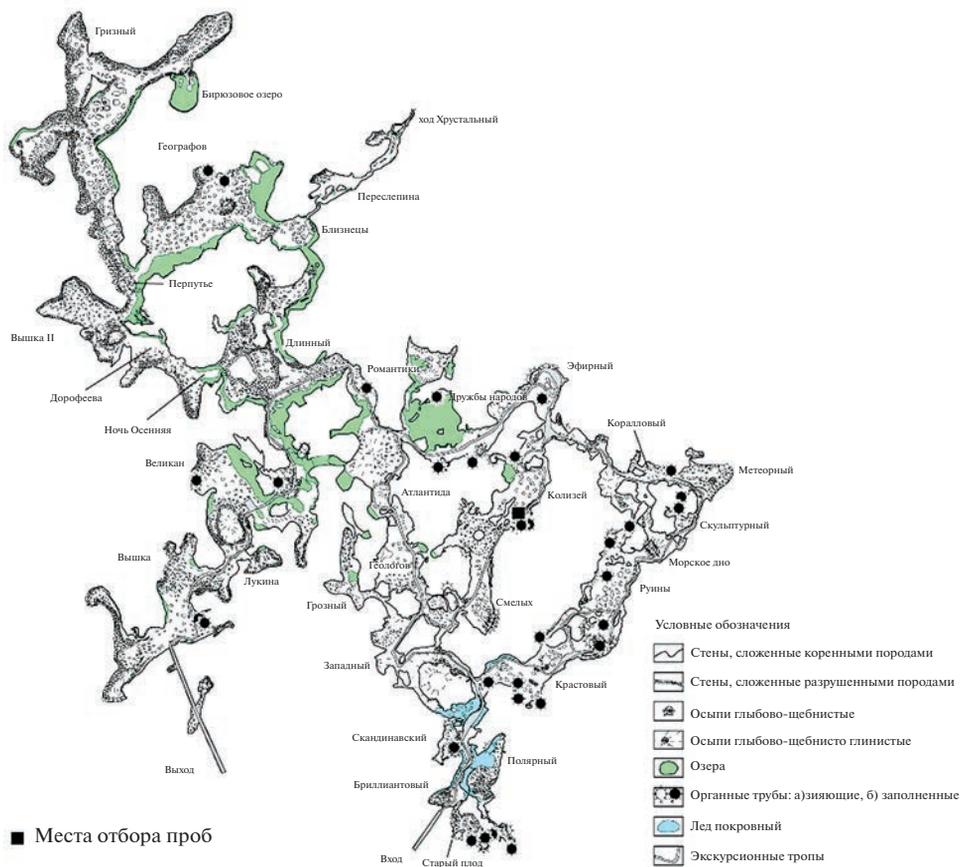


Рис. 3. Карта Кунгурской ледяной пещеры [7] с обозначением места отбора проб.

Fig. 3. Map of the Kungur ice cave [7] with the designation of the sampling site.

Как и в случае с оксидами, содержание всех элементов в инфильтрационных и остаточных отложениях в 2–3 раза больше, чем в дезинтегрированных вмещающих породах. Для Zn, Sr, Mo, Sn отмечается постепенное уменьшение к нижним слоям, для Y, Nb, Cs – наоборот, увеличение. La в коренных породах отсутствует, Ce в них же меньше в 6 раз.

ОБСУЖДЕНИЕ

В типе водных механических отложений в Кунгурской Ледяной пещере выделены инфильтрационные отложения. К ним отнесены отложения тонких (глинистых) фракций, кольматирующие крупнообломочные отложения осыпей (щебень и более крупные обломки карбонатных и дресва сульфатных пород), расположенных непосредственно под органическими трубами. Наличие понор на дне карстовых воронок на поверхности Ледяной горы позволяет предполагать, что обнаруженная в осыпях под органическими трубами галька также поступала в пещеру с поверхности [7].

В результате комплексных исследований последних десятилетий в Кунгурской пещере изучен новообразованный кальцит непосредственно из инфильтрационных

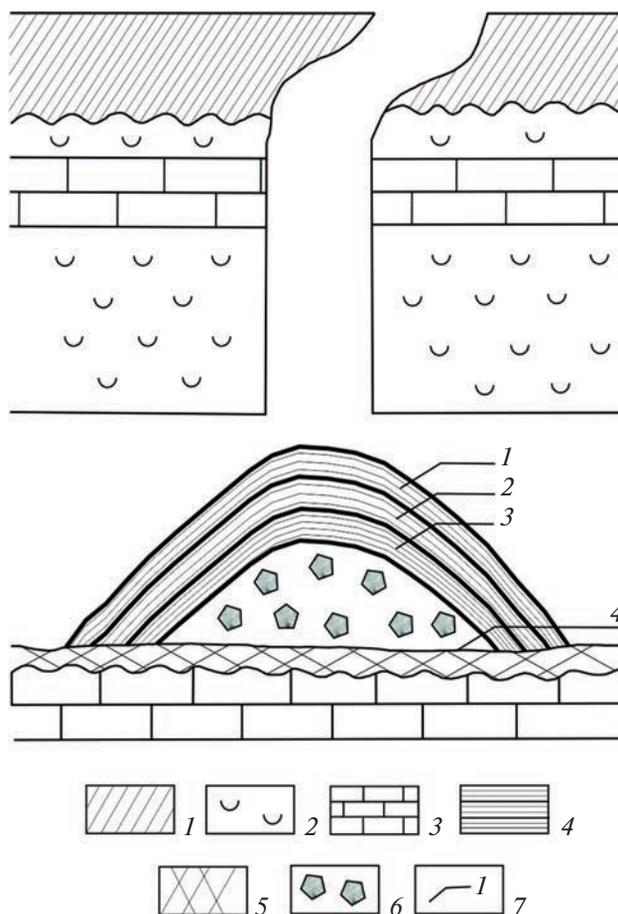


Рис. 4. Места отбора проб из инфильтрационных отложений в схематическом геологическом разрезе органной трубы. 1 – четвертичные отложения: суглинок, супесь; 2 – гипс, ангидрит; 3 – известняк, доломит; 4 – глина; 5 – древесно-щебнистые отложения; 6 – обвальные отложения; 7 – номера проб.

Fig. 4. Sampling sites from infiltration deposits in a schematic geological section of an organ pipe. 1 – quaternary deposits: loam, sandy loam; 2 – gypsum, anhydrite; 3 – limestone, dolomite; 4 – clay; 5 – gravel-gravelly deposits; 6 – landslide deposits; 7 – sampling site.

сульфатно-кальциевых вод [6]. Объем, скорость, а также периодичность движения инфильтрационных вод в зоне вертикальной циркуляции, мощность которой составляет около 60 м, весьма разнообразны. Это и отдельные капли, падающие равномерно в течение всего года, либо сливающиеся в небольшие струйки весной. Иногда весной на короткий период до 7–10 дней расход воды увеличивается до 2.0 л в минуту. В большинстве случаев инфильтрация воды с поверхности происходит в районе органических труб. В отдельных случаях капель со свода происходит без видимой связи с трещинами и другими водоподводящими структурами.

При общем нисходящем движении инфильтрационных вод проследить весь путь на каждом отдельном участке геологического разреза практически невозможно. Однако

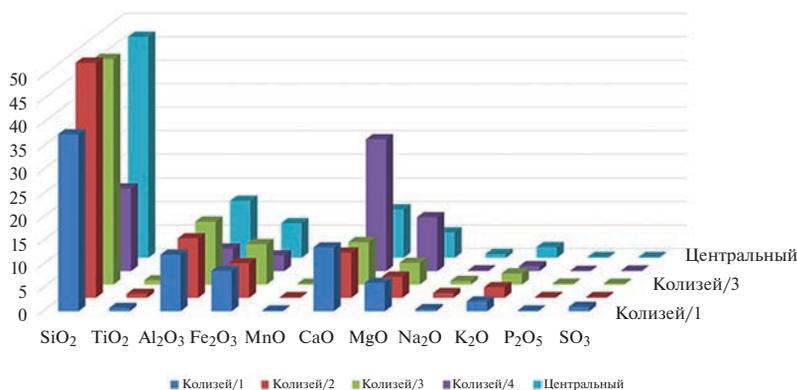


Рис. 5. Химический состав инфильтрационных и остаточных отложений в Кунгурской Ледяной пещере.

Fig. 5. Chemical composition of infiltration and residual deposits in the Kungur Ice Cav.

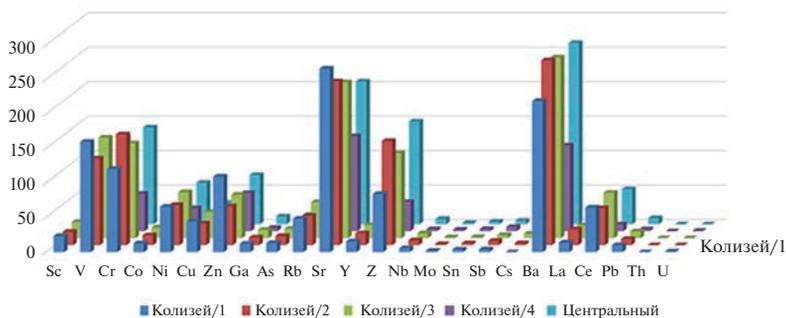


Рис. 6. Содержание химических элементов в инфильтрационных и остаточных отложениях Кунгурской ледяной пещеры.

Fig. 6. Content of chemical elements in infiltration and residual deposits of the Kungur Ice Cave.

на подходе к гроту Космический удалось зафиксировать промежуточный уровень стояния инфильтрационных вод на абсолютной отметке 130 м в зоне вертикальной циркуляции. Отметка кровли грота Космический является одной из самых высоких в Кунгурской пещере. В сводах и стенах вскрыты доломиты неволинской пачки, которые перекрывают гипсы и ангидриты ледянопещерской пачки, в пределах которой образовалось подавляющее большинство гротов и галерей пещеры на уровне водоносного горизонта 112–113 м.

Подход к гроту представляет собой крупнообломочную осыпь высотой 20 м крутизной от 30 градусов у основания до 60 – вверх. В верхней части северо-западного сектора осыпь покрыта сплошным покровом остаточной глины мощностью до 20 см, площадью 10 м² с отчетливыми следами течения воды. Сверху отмечается тонкий черный налет, предположительно, четырехвалентных окислов марганца. Аналогичный черный налет отмечается в нижней части нависающего свода. Разница в окраске гипсового целика фиксирует уровень инфильтрационных вод, задержанных на достаточно длительный период. Подпор стекающих с поверхности Ледяной горы вод происхо-

дил вглубь массива, по всей видимости, на более ранних стадиях формирования пещеры [8].

При замерзании инфильтрационных вод в первичных пустотах будущей карстовой системы и в дальнейшем – в периоды промерзания происходили криоминералогические процессы. В настоящее время отмечаются морфологические и кристаллические особенности криогенного кальцита для всех температурных зон Кунгурской пещеры. Разнообразие криогенного материала определяется микроклиматическими факторами и нано-условиями [1].

К микроклиматическим факторам можно отнести особенности промерзания пород на определенных этапах существования многолетнемерзлых пород. У\Th датировки криогенных минеральных образований в пещерах Урала позволяют достаточно точно определять периоды межледниковий и, соответственно, динамику границы распространения многолетнемерзлых пород. В каждой из трех крупных пещер на границе Соликамской впадины в пределах Предуральяского прогиба обнаружен разновозрастный криогенный кальцит в интервале от 11–13 до 430–480 тыс. лет [4, 5].

Сеть лабиринтовых ходов Кунгурской пещеры заложена на уровне первой надпойменной террасы р. Сылвы. Согласно данным археологических находок, период формирования первой террасы – 8000–7000 лет до н.э., второй – 12000 тыс. лет до н.э. [3], что свидетельствует о молодом возрасте пещеры. Исходя из геометрических параметров гrotов и галерей, а также из скорости растворения сульфатных пород, можно рассчитать абсолютный возраст пещеры. В этом случае цифра будет выше – более 50 тыс. лет [10]. Особенности геологического строения массива, в котором заложена карстовая система, геоморфологические условия, условия развития водоносных горизонтов, биоспелеологические данные свидетельствуют о более длительном развитии Кунгурской пещеры в течение всего четвертичного периода [7].

Отсутствие нарушенности в залегании глинистых слоев в осыпи под органной трубой предполагает цикличность поступления материала в спелосистему, которую можно сопоставить с многократными изменениями в ходе экзогенных процессов при чередовании глобальных похолоданий и потеплений. В перигляциальной зоне промывание рыхлых отложений могло происходить водами, в т.ч. напорными, циркулирующими в многолетнемерзлых породах на значительном удалении от фронта ледника. Периодическая инфильтрация вод способствовала также растворению сульфатных пород и перемещению глинистых частиц по трещиноватым и деформационным зонам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составляющая инфильтрационных вод в общем водном балансе массива несоизмеримо мала по сравнению с карстовыми водами. Однако формирование органной трубы невозможно без просачивающихся с поверхности Ледяной горы дождевых и талых вод на различных этапах формирования карстовой системы [8].

В позднем плейстоцене отмечаются несколько этапов криогенеза, интенсивность которого нарастала и закончилась деградацией мерзлоты [9]. В отсутствие проявлений мерзлотных процессов на поверхности инфильтрационные отложения Кунгурской пещеры можно сопоставить с криогенными горизонтами верхнего плейстоцена.

Климатические ритмы отражаются в лесово-почвенных разрезах в наземных условиях, а также в слоистых инфильтрационных отложениях карстовых пустот и различных типах криогенных минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчук В.Н., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 2001. С. 108–116.

2. Вейсман Л.И., Дорофеев Е.П., Андрейчук В.Н. Кунгурская Ледяная пещера. Фотоальбом. Пермь, 1990. 295 с.
3. Лукин В.С. Условия и этапы формирования Кунгурской пещеры // Карст Урала и Приуралья: Матер-лы Всеросс. Совещ. Пермь, 1968. С. 39–42.
4. Кадебская О.И. Минеральные и геохимические индикаторы природных процессов в подземных карстовых ландшафтах Урала // Автореф. докт геогр. наук. Пермь, 2017. 39 с.
5. Кадебская О.И. Периоды оттаивания многолетнемерзлых пород в плейстоцене в районе Соликамской впадины // Горное эхо. Пермь, Горный ин-т УрО РАН, 2021. № 3 (84). С. 3–9.
6. Кадебская О.И., Калинина Т.А., Чайковский И.И. Изотопия и морфология новообразованных карбонатов карбонатно-сульфатного массива Ледяная гора // Вест. Пермского ун-та. Геология. Вып. 2 (27). Пермь, 2015. С. 6–16.
7. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под ред. В.Н. Дублянкого. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 376 с.
8. Лаврова Н.В., Красиков А.В. К вопросу обводненности массива Ледяной горы / Пещеры: сб. науч. тр. / Естественнонауч. ин-т Перм. Гос. нац. ун-та; ГИ УрО РАН. Пермь, 2018. Вып. 41. С. 6–8.
9. Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет (Атлас-монография). М.: Наука, 1982. 175 с.
10. Турышев А.В. Подземные воды Кунгурской Ледяной пещеры // Специальные вопросы карстологии. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 62–67.

Geochemical Characteristics Infiltration Deposits Kungur Ice Cave (Preduralie)

N. V. Lavrova*

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*E-mail: nlavrova08@mail.ru

Abstract—The results of spectral analyses of infiltration deposits of a large karst system in carbonate-sulfate deposits are presented. The movement of loose material from the surface through deformation zones within an array with a capacity of 80–90 m leads to accumulations of gravel-clay deposits in the lower part of grottoes and galleries. The localization of deposits is confined to certain forms of underground karst relief – organ pipes: vertical structures up to 20–25 m high, free or filled with debris. Regularities in the distribution of individual oxides and elements are revealed, their values are compared with residual deposits, as well as matrix rocks. Infiltration waters entering the karst massif in the pre-paleogenic stage determined the conditions for the formation of cryogenic minerals during the freezing of rocks. The cyclical nature of the material intake is compared with the periods of Late Pleistocene climatic events.

Keywords: infiltration deposits, karst system, organ pipes, cryogenesis, Kungur Ice Cave, Late Pleistocene, climatic rhythms

REFERENCES

1. Andrejchuk V.N., Galuskin E. Kriogennye mineralnye obrazovaniya Kungurskoj Ledyanoj peshhery // Peshhery. Perm, 2001. S. 108–116.
2. Vejsman L.I., Dorofeev E.P., Andrejchuk V.N. Kungurskaja Ledjanaja peschera. Fotoalbm. Perm, 1990. S. 295.
3. Lukin V.S. Usloviya i etapy formirovaniya Kungurskoj peshhery // Karst Urala i Priuralya: Materly Vseross. Soveshh. Perm, 1968. S. 39–42.
4. Kadebskaya O.I. Mineralnye i geoximicheskie indikatory prirodnyx processov v podzemnyx karstovyx landshaftax Urala // Avtoref. dokt geogr. nauk. Perm, 2017. S. 39.
5. Kadebskaya O.I. Periody ottaivaniya mnogoletnemerzlyx porod v plejstocene v rajone Solikamskoj vpadiny // Gornoe exo. Perm, Gornyj in-t UrO RAN. 2021. № 3 (84). S. 3–9.
6. Kadebskaya O.I., Kalinina T.A., Chajkovskij I.I. Izotopiya i morfologiya novoobrazovannyx karbonatov karbonatno-sul'fatnogo massiva Ledyanaya gora // Vest. Permskogo un-ta. Geologiya. Vyp. 2 (27). Perm, 2015. S. 6–16.

-
7. Kungurskaya Ledyanaya peshhera: opyt rezhimnyh nablyudenij / Pod red. V.N. Dublyankogo. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. S. 376.
 8. *Lavrova N. V., Krasikov A. V.* K voprosu obvodnennosti massiva Ledyanoj gory / Peshhery: sb. nauch. tr. / Estestvennonauch. in-t Perm. Gos. nacz. un-ta; GI UrO RAN. Perm, 2018. Vyp. 41. S. 6–8.
 9. Paleogeografiya Evropy za poslednie sto tysyach let (Atlas-monografiya). M.: Nauka, 1982. 175 s.
 10. *Turyshchikov A. V.* Podzemnye vody Kungurskoj Ledyanoj peshhery // Specialnye voprosy karstovedeniya. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. S. 62–67.