

Физико-географические исследования

УДК 556.383

О.И. Кадебская

ХАРАКТЕРИСТИКА ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ МЕЖЛЕДНИКОВИЙ ИЗ ПЕЩЕРЫ КИЗЕЛОВСКАЯ (ВИАШЕРСКАЯ)*

В статье дана характеристика древних криогенных карбонатов из пещеры Кизеловская (Средний Урал). Приведены отличия в изотопном составе С и О криогенных карбонатов от натечных образований. При помощи метода U/Th датирования получен возраст криогенного минералообразования ($434,676 \pm 7,276$ тыс. лет). Установленные морфологические отличия отдельных кристаллов позволят в дальнейшем отобрать для датировки выявленные типы и установить их возрастные отличия. Совмещение данных датировок криогенного кальцита с геохронологической шкалой позволит точно установить время начала межледниковых периодов в пределах Среднего Урала. В рамках исследования определены структурно-морфологические и изотопно-геохимические признаки криогенного кальцита в пещере Кизеловская (Виашерская). В работе доказано, что отложения в Кизеловской (Виашерской) пещере являются уникальным палеоклиматическим архивом на протяжении более 400 тыс. лет, что выводит пещеру в список наиболее ценных пещер Урала. На основе данного исследования возможно составление методики поиска древнего криогенного кальцита, а также разработки специальных правил для посещения таких пещер туристами.

Ключевые слова: карбонаты, пещеры, криогенез, изотопный состав, геохронология, палеоклимат.

Абсолютное датирование натечных кор и сталагмитов U/Th методами плазменной и термоионизационной масс-спектрометрии давно используется для палеогеографических реконструкций прошлого. Атмосферные воды, просачивающиеся через почву и породу, несут в себе информацию о климате на поверхности и в стабильных условиях пещер при кристаллизации натечных образований сохраняются на протяжении сотен тысяч лет. Пик оледенения характеризуется малым количеством осадков и низкими температурами. В начале интерстадиалов наблюдается потепление и увеличение количества осадков; как следствие, увеличиваются объемы талых, снеговых и ледниковых вод, которые могут поступать в подземные полости. Межледниковые периоды характеризуются теплым и влажным климатом, высокими летними и дневными зимними температурами воздуха, значительной мощностью почвенного покрова и пышной растительностью, высокой агрессивностью инфильтрационных и инфлюационных вод, проходящих через карстовые массивы [1].

Первые работы, посвященные криогенным маркерам, сформированным во время межледниковий, были выполнены в Центральной Европе [2]. Было установлено, что крупные криогенные карбонаты из 20 пещер Германии, Чехии, Словакии и Польши сформировались в условиях медленного замерзания льда, что обусловило фиксацию в кристаллической структуре льда тяжелого изотопа кислорода ^{18}O . Теоретические подтверждения этого эффекта были обоснованы Вестоном [3] и экспериментально измерены в 1968 г. [4]. Было установлено, что более легкие молекулы ^{16}O обладают большей кинетической энергией, чем тяжелые и более подвижны. При замерзании лед оказывается обогащенным тяжелыми изотопами по сравнению с водой, а вода обогащена ими по сравнению с паром. Эта идея является ключевой в современных публикациях, посвященных изотопной климатологии.

Опубликованная модель формирования древнего криогенного кальцита [2] в европейских пещерах была построена на основании следующих доводов: во время потеплений и таяния вечномерзлых пород с поверхности карстовые воды проникают в пещеру, расположенную еще в зоне отрицательных температур, где вода медленно замерзала одновременно снизу и со стороны промерзших стен. Кристаллизация криогенного кальцита в основном происходила внутри льда. После таяния льда образовавшиеся кальцитовые агрегаты свободно оседали на дне карстовой полости, стенках или отдельно стоящих глыб. Таким образом, расположение границ вечномерзлотных пород и синхронность интерстадиалов в разных широтных зонах можно получить по новым палеоклиматическим маркерам – криогенным пещерным карбонатам [5].

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-55-14002 «Миграция границы многолетней мерзлоты на границе Европа-Азия в плейстоцене».

Описание древнего криогенного кальцита в Российской пещере позволило показать длительность существования холодных периодов в истории квартера на Среднем Урале и предположить весьма специфические обстановки и механизмы минералообразования [5]. Ранее было установлено, что криогенный пещерный кальцит на Урале формировался в широком возрастном диапазоне (от 13,038 до 670,805 тыс л.н. во время межледниковий) [5; 6]. Целью работ является установление новых объектов с криогенным пещерным кальцитом, проведение датирований, на основании чего возможна корреляция отдельных интервалов четвертичной истории в разных палеогеографических зонах Урала и установление границы вечномёрзлотных пород.

Пещера Кизеловская (Виашерская) находится на территории г. Кизел на правом берегу р. Виашер, в основании 10-метрового уступа известняков визейского яруса нижнего карбона. Протяженность ходов 7,6 км, глубина – 46 м.

Пещера относится к лабиринтовому типу и имеет ярусное расположение ходов и гротов. Основным является средний горизонтальный ярус. В пещере открыто более 90 гротов.

Пещера была открыта в 50-х гг. XIX в. Наиболее полное описание составил С.В. Валуйский по материалам Нижнетагильской, Березниковской и Пермской спелеосекций. Вглубь пещеры ведут два входа: западный (старый) представляет собой большое нишеобразное углубление в форме треугольника с основанием 6 м и высотой 2,5 м. Пещеру можно условно разделить на юго-западную, так называемую Старую пещеру, и северо-восточную – Новую пещеру, открытую в январе 1971 г. нижнетагильскими спелеологами. Старая пещера состоит из двух основных ходов, западного и восточного направления. Новая имеет меридиональное направление и большая ее часть горизонтальная. Наибольшие из гротов Кизеловской пещеры: Морское Дно, Амфитеатр, Спелеологов, Исполин, Лодка, Ильича, Радуга. На необычный кальцит в пещере Кизеловская (Виашерская) впервые обратил внимание губахинский спелеолог С.А. Меньших. В дальнейшем в результате нескольких экспедиций совместно с пермским клубом спелеологов криогенный кальцит был обнаружен в гротах Радуга, Хозяин, Восточный Перекресток, Опасный Камень, Кристальный и Жемчужный. Гроты с криогенным кальцитом находятся на глубине 30–50 м от земной поверхности, в нейтральной микроклиматической зоне, где температура воздуха равна температуре карстового массива, и в настоящее время в течение всего года положительная (5,3 °С).

Материалы и методика исследований

В лабораторных условиях были проведены структурно-морфологические и изотопно-химические исследования. Изучение морфологии и химического состава проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 в Горном институте УрО РАН (аналитики Е.П. Чиркова, О.В. Коротченкова).

Изотопные анализы углерода и кислорода выполнялись группой Innsbruck Quaternary Group при Инсбрукском университете (руководитель – академик Австрийской академии наук, профессор Кристоф Шпётль) на масс-спектрометре Delta PLUS XL (Fisher Scientific), оснащённом автоматической линией для анализа карбонатов на основе интерфейса GASBENCH (Fisher Scientific).

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -датировки были выполнены методом масс-спектрометрии с термической ионизацией (TIMS). Изотопы U-серии были измерены масс-спектрометром MAT 262 RPQ TIMS в университете г. Шьян (Китай, руководитель Х. Ченг). Все коэффициенты активности были вычислены при помощи постоянных показателей радиоактивного распада по Х. Ченг и др. [7] и скорректированы по детритовому Th, предполагая, что кларковое соотношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$, равное 3,8, для детритового материала и ^{234}U и ^{238}U находятся в вековом равновесии. Абсолютные даты указаны в тыс. лет назад от наших дней (то есть от 1950 г.).

На сегодняшний день криогенный кальцит найден в 10 пещерах Северного, Среднего и Южного Урала. Микроклиматические измерения в гротах, где находились криогенные образования позволили установить, что в течение всего года там сохранялись положительные температуры (от 3 до 5,5 °С). Чаще всего криогенный кальцит расположен в пещерах с меандровыми галереями и объемными гротами. Основным отличием криогенного кальцита от обычных натечных образований является его местонахождение. Криогенный кальцит находился в центральных частях больших гротов или у стен в более низких местах. Обычно это скопления крупных и мелких кристаллов, которые лежат на поверхности глинистого субстрата, на камнях или в трещинах на стенах. Очень часто в таких

гротах, где есть находки криогенного кальцита, много поломанных льдом более древних натечных образований (сталактитов, сталагмитов и кор). Так как Кизеловская пещера посещается на протяжении последних 70 лет, криогенный кальцит, к сожалению, был затоптан туристами в глинистые отложения, и в неизменном виде остался только под большими камнями и пристенных нишах.

На сегодняшний день его наибольшее количество расположено в гроте Радуга, где кристаллы криогенного кальцита имеют размер от 0,1 мм до 6,5 см. Кристаллы лежат в свободном пространстве как на крупных глыбах, так и на дне грота. В основном это белые, бежевые и коричневые отдельные кристаллы (конфигурация ромбоэдра с пинакоидом), иногда на концах расщепленные (рис. 1-а, б). В отобранной пробе кристаллы размером до 2 мм составили 30 %. Во всех гротах кристаллы криогенного кальцита размером более 2 мм представлены агрегатами расщепленных кристаллов (до сферолитов), иногда имеющих следы совместного роста с кристаллами льда (рис. 1-и, к, л). Реже отмечаются бежевые и медовые корочки, обросшие мелкими кристаллами кальцита (рис. 1-в, е), отдельные крупные бежевые кристаллы (рис. 1-г) и агрегаты кристаллов, покрытые белым налетом (рис. 1-д).

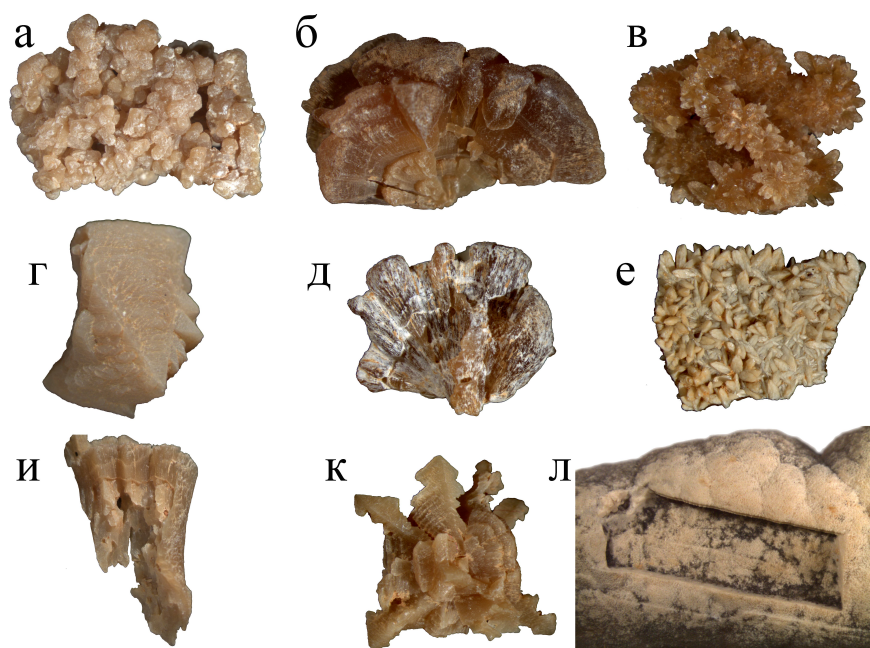


Рис. 1. Морфология криогенного кальцита из гротов Радуга, Восточный Перекресток, Опасный Камень, Кристальный и Жемчужный: а, б, в, е – агрегаты, состоящие из расщепленных индивидов и сферолитов; г – крупные (до 2 см) бежевые кристаллы; д – кристаллы, покрытые белым налетом; и, к, л – кристаллы, имеющие следы совместного роста с кристаллами льда

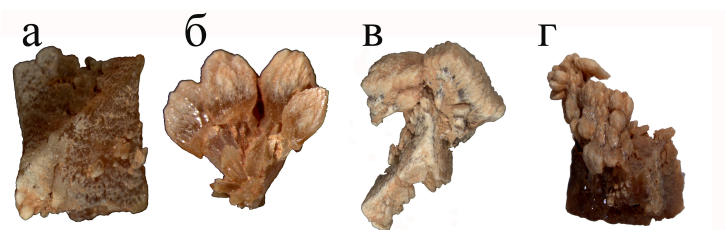


Рис. 2. Криогенные образования из грота Восточный Перекресток: а – кристаллы первой генерации с индукционной поверхностью; б – кристаллы второй генерации; в, г – кристаллы с дефектами, которые могут свидетельствовать о совместном росте с кристаллами льда

Преобладающим (85 %) типом криогенного кальцита из грота Восточный Перекресток являются агрегаты, сформированные кристаллами двух генераций: первая генерация представлена крупными (до 2 см) отдельными медовыми кристаллами (рис. 2-а), вторая – более мелкими (0,4 см), расщепленными бежевыми кристаллами (рис. 2-б). Кристаллы второй генерации росли на поверхности медовых кристаллов, что может указывать на их более позднее образование (рис. 2-в, г). Многие кри-

сталлы имеют дефекты, которые могут свидетельствовать о совместном росте с кристаллами льда (рис. 2-в, г). Остальные 15 % криогенных кристаллов представлены мелкими (до 1,5 см) бежевыми корочками, состоящими из расщепленных индивидов, размером до 0,2 см (рис. 1-е).

Криогенные кристаллы в гроте Хозяин на 50 % представлены мелкими индивидами с признаками скелетного строения, несущими на поверхности следы совместного роста со слоями льда (рис. 3). Морфология индивидов позволяет говорить о том, что они были ориентированы по-разному к поверхности льда и росли в тонкой стекающей пленке воды.

Таким образом, морфология сферолитов позволяет предположить, что их рост происходил в свободном пространстве, вероятно, в водной среде (рис. 4 тип а).

Морфология агрегатов, на поверхности которых зафиксированы отпечатки индукционных граней с кубической фазой, позволяют предположить, что кристаллы данной группы кристаллизовались на поверхности карнизов или заберегов, примыкающих к стенам (рис. 4 тип б).

Плоские корочки и отдельные кристаллы с плоским основанием говорят об образовании их в водной пленке на поверхности льда.



Рис. 3. Криогенные образования из грота Хозяин, несущие на поверхности следы совместного роста со слоями льда

Кристаллы ячеисто-каркасного строения свидетельствуют о скелетном росте или твердом распаде некогда единой минерально-ледяной фазы (рис. 4 тип в).

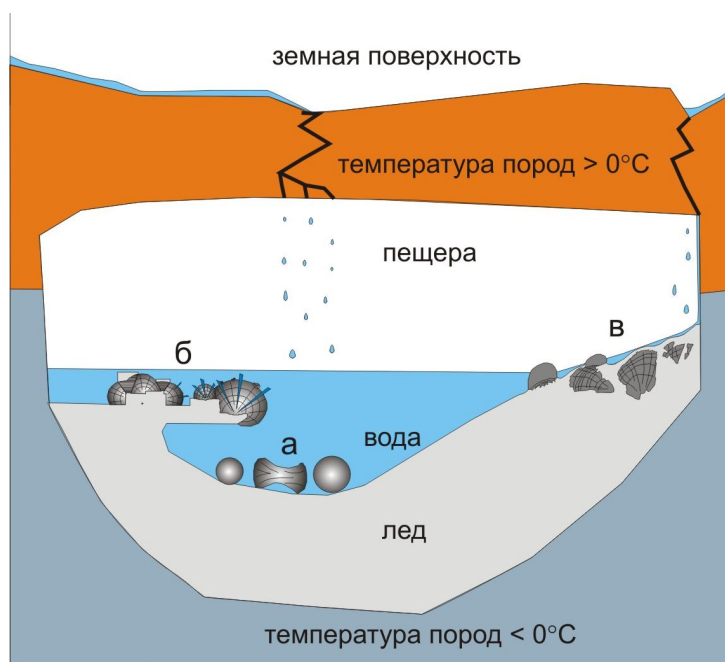


Рис. 4. Обстановки минералообразования криогенного кальцита: а – рост в свободном пространстве; б – рост на подложке и совместный рост с кубической и каркасной фазами; в – совместный рост кальцита со слоями льда в тонкой пленке стекающей воды

Для изучения изотопного состава и проведения датирования из образцов был выбран наиболее крупный агрегат сферолитовых кристаллов размером 6,5 см. Изотопный профиль показал (табл., рис. 5), что соотношение изотопов и направление фракционирования от центра к краю близко к составу криогенных сферолитов европейских пещер [2].

Изотопный состав углерода и кислорода криогенного кальцита из Кизеловской (Виашерской) пещеры

№ анализа	Изотопный состав	
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$
1	-21,41	-9,12
2	-21,15	-9,05
3	-21,20	-9,10
4	-20,86	-9,25
5	-20,64	-9,27
6	-20,65	-9,34
7	-20,73	-9,49
8	-20,81	-9,29
9	-20,60	-9,21
10	-20,71	-9,30
11	-20,69	-9,44
12	-20,70	-9,16
13	-20,65	-9,39
14	-20,58	-9,38
15	-21,14	-9,24

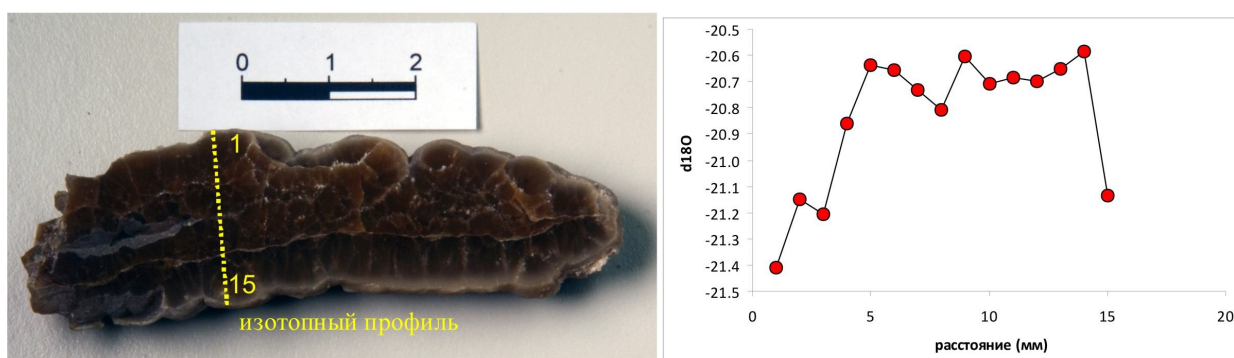


Рис. 5. Расположение изотопного профиля и фракционирование $\delta^{18}\text{O}$ от центральной части криогенного агрегата к краевым частям

Состав криогенного кальцита отличается по составу от натечных образований пещер Среднего Урала (рис. 6).

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ датирование криогенного кальцита позволило установить возраст их образования $434,676 \pm 7,276$ тыс лет, что соответствует началу интерстадиала MIS 11 на изотопно-кислородной записи NGRIP [9].

Заключение

Таким образом, в работе доказано, что экстремальные (холодные и теплые) периоды в истории Урала возможно реконструировать на основе геохимических и изотопных характеристик процессов минералообразования на примере натечных спелеотем и пещерного криогенного кальцита. В рамках исследования определены структурно-морфологические и изотопно-геохимические признаки криогенного кальцита в пещере Кизеловская (Виашерская). В работе доказано, что отложения в Кизеловской (Виашерской) пещере являются уникальным палеоклиматическим архивом на протяжении более 400 тыс лет, что выводит пещеру в список наиболее ценных пещер Урала. На основе данного иссле-

дования возможно составление методики поиска древнего криогенного кальцита, а также разработки специальных правил для посещения таких пещер туристами. В дальнейшем по проведенным датировкам криогенного кальцита из других пещер России позволит более точно проследить изменение границы вечной мерзлоты после оледенений.

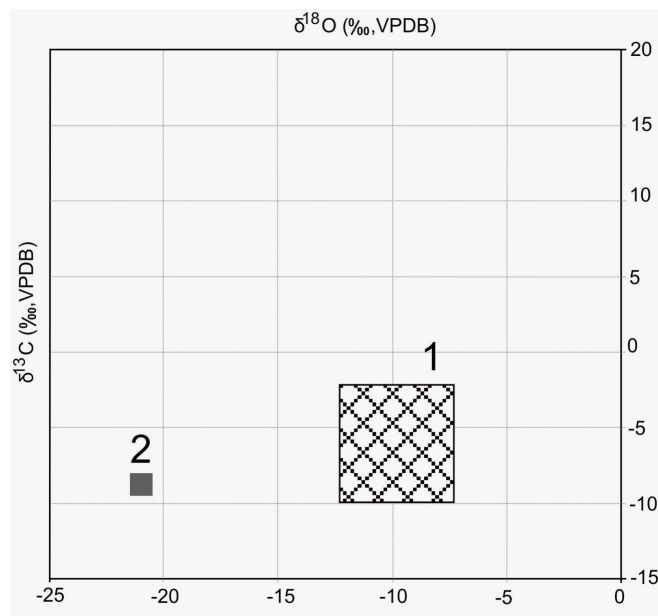


Рис. 6. Соотношение изотопов углерода и кислорода натечных образований (1) из пещер Среднего Урала и криогенного кальцита (2) из пещеры Кизеловская (Виашерская) [8]

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-55-14002 «Миграция границы многолетней мерзлоты на границе Европа-Азия в плейстоцене».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстоведение. Ч. I. Общее карстоведение: учеб. пособие. Пермь: ПГУ, 2004. 306 с.
2. Zak K., Richter D.K., Filippi M., Zivor R., Deininger M., Mangini A., Scholz D. Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe // *Climate of the Past*. 2012. № 8. P. 1-17.
3. Weston R.E. Hydrogen isotope fractionation between ice and water // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1955. Vol. 8. P. 281-284.
4. O'Neil J.R. Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water // *J. Phys. Chem.* 1968. Vol.72 (10). P. 3683-3684.
5. Чайковский И.И., Кадебская О.И., Жак К. Морфология, состав, возраст и природа карбонатных сферолитов из пещер Западного Урала // *Геохимия*. 2014. № 4. С. 373-384.
6. Dublyansky Y., Kadebskaya O., Luetscher M., Cheng H., Chaykovskiy I., Spötl Ch. Preliminary data on the Pleistocene history of permafrost in Central Ural (Russia) derived from cryogenic cave carbonates // *The Quaternary of the Urals: global trends and Pan-European Quaternary records: International conference INQUA-SEQS 2014*. Ekaterinburg, 2014. P. 43-45.
7. Cheng H., Edwards R.L., Hoff J., Gallup C.D., Richards D.A., Asmerom Y. The half-lives of uranium-234 and thorium-230 // *Chemical Geology*. 2000. Vol. 169, № 1-2. P. 17-33.
8. Кадебская О.И. Геохимия стабильных изотопов углерода и кислорода карбонатов из пещер Пермского края / Стратегия и процессы освоения георесурсов // *Материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2010 г. Пермь*. 2011. С. 7-9.
9. North Greenland Ice Core Project Members: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period // *Nature*. 2004. Vol. 431. P. 147–151.

O.I. Kadebskaya

CHARACTERISTICS OF PALEOCLIMATIC MARKERS OF INTERGLACIALS FROM THE KIZELOVSKAYA (VIASCHERSKAYA) CAVE

The paper is dedicated to the characteristics of ancient cryogenic carbonates of the Kizelovskaya cave (Middle Urals). The article shows the difference in the isotopic composition of C and O by cryogenic carbonate sinter formations. Formation was received using the method of U/Th dating age. The age of cryogenic mineral formations is $434,676 \pm 7,276$ thousand years. Morphological differences between individual crystals that were deduced during the research offer to select for dating the revealed types and work out the differences of their age. This data with the geological time scale will accurately set the beginning interglacial periods within the Middle Urals. Within the research the structural-morphological, isotope and geochemical signs of cryogenic calcite of the Kizelovskaya (Viasherskaya) cave have been defined. In the article it is proved that deposits in Kizelovskaya (Viasherskaya) cave are unique paleoclimatic archive for more than 400 thousand years. This fact makes the cave one of the most valuable caves of the Urals. This research can become a base for a new technique of search of ancient cryogenic calcite, and also for development of special rules for tourists who want to visit such caves.

Keywords: carbonates, caves, cryogenic origin, isotope composition, geochronology, paleoclimate.

REFERENCE

1. Dublyanskij V.N. and Dublyanskaja G.N. *Karstovedenie. Ch. I. Obschee karstovedenie: ucheb. posobie* [Karst. Part I. General Karst: Proc. benefit], Perm: PGU, 2004, 306 p. (in Russ.).
2. Zak K., Richter D.K., Filippi M., Zivor R., Deininger M., Mangini A. and Scholz D. Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe, in *Climate of the Past*, 2012, no 8, pp. 1–17.
3. Weston R.E. Hydrogen isotope fractionation between ice and water, in *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1955, vol. 8, pp. 281-284.
4. O'Neil J.R. Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water, in *J. Phys. Chem.*, 1968, vol.72 (10), pp. 3683–3684.
5. Chajkovskij I.I., Kadebskaja O.I. and Zhak K. [Morphology, composition, age and origin of carbonate spherulites from caves of Western Urals], in *Geohimija*, 2014, no. 4, pp. 373-384 (in Russ.).
6. Dublyansky Y., Kadebskaja O., Luetscher M., Cheng H., Chaykovskiy I. and Spötl Ch. Preliminary data on the Pleistocene history of permafrost in Central Ural (Russia) derived from cryogenic cave carbonates, in *The Quaternary of the Urals: global trends and Pan-European Quaternary records: International conference INQUA-SEQS 2014*, Ekaterinburg, 2014, pp. 43-45.
7. Cheng H., Edwards R.L., Hoff J., Gallup C.D., Richards D.A. and Asmerom Y. The half-lives of uranium-234 and thorium-230, in *Chemical Geology*, 2000, vol. 169, no. 1-2, pp. 17-33.
8. Kadebskaja O.I. [Geochemistry of stable isotopes of carbon and oxygen of carbonates from the caves of the Perm region / strategy and development processes georesources], in *Materialy ezhegod. nauch. ses. GI UrO RAN po rezul'tatam NIR v 2010 g*, Perm, 2011, pp. 7-9 (in Russ.).
9. North Greenland Ice Core Project Members: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, in *Nature*, 2004. Vol. 431, pp. 147–151.

Кадебская Ольга Ивановна,
кандидат географических наук,
заведующая Кунгурской лабораторией-стационаром
ФГБУН «Горный Институт УрО РАН»
614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а
E-mail: iccave@bk.ru

Kadebskaya O.I.,
Candidate of Geography,
Head of the Kungur laboratory
Mining Insitute of Ural Branch of RAS
Sibirskaya st., 78a, Perm, Russia, 614007
E-mail: iccave@bk.ru