

© О. И. КАДЕБСКАЯ,* Ю. В. ДУБЛЯНСКИЙ,** д. чл. О. В. КОРОТЧЕНКОВА*

ХАРАКТЕРИСТИКА ВТОРИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПЕЩЕРЕ СТАРАТЕЛЕЙ (СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

* Горный институт Уральского отделения РАН,
614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а

** Институт геологии Инсбрукского университета (Австрия), 6020, Innsbruck, Austria;
e-mail: icecave@bk.ru

В статье впервые приведены сведения о криогенных и натечных минеральных образованиях пещеры Старателей на р. Сосьва (Северный Урал). Пещера была обнаружена и обследована спелеологами в 2011 г. На сегодняшний день она является одной из самых больших по объему подземных полостей Свердловской области. При посещении пещеры в 2016 г. авторами кроме обычных пещерных минеральных образований (криогенной муки и натечных отложений) были обнаружены агрегаты кальцита светло-желтой окраски и проявления пещерного жемчуга. Облегченный состав кислорода, а также более тяжелый состав углерода в кальците светло-желтой окраски дает основание отнести его к криогенным минералам, образованным при медленном замерзании раствора. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -датирование этого кальцита позволило установить время деградации многолетней мерзлоты на восточном склоне Северного Урала, связанной с потеплением климата 85.4 ± 0.5 тыс. лет назад. Возраст пещерного жемчуга составил 7.4 ± 2.1 тыс. лет. Радиометрическое определение возраста сталагмитов пещеры не проводилось из-за низких содержаний урана и возможной «открытости» изотопов U-Th системы.

Ключевые слова: пещеры, минералогенез, изотопный состав, геохронология, палеоклимат.

O. I. KADEBSKAYA,* Yu. V. DUBLYANSKY,** O. V. KOROTCHENKOVA.* CHARACTERISTICS OF SECONDARY DEPOSITS IN THE STARATELEY CAVE (SVERDLOVSK REGION)

* Mining Institute, Ural Branch RAS, Perm, Russia

** Institute of Geology, Innsbruck University, Innsbruck, Austria

The paper reports, for the first time, on cryogenic minerals and flowstones in the Starateley cave on the River Sos'va (the Northern Urals). The cave was found and explored in 2011; presently it is one of the largest, in terms of its volume, underground caverns in the Sverdlovsk Region. Upon our visit in 2016 in addition to «common» speleothems, such as cryogenic flour and flowstone, we have found peculiar aggregates of yellowish calcite as well as cave pearls. The depleted O and enriched C isotope signatures indicate cryogenic origin of this calcite and its formation from slowly freezing solution. Dating cryogenic calcite with $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ method allow to constraint the time of climate warming-related thawing of permafrost on the eastern slope of the Northern Ural Mountains to 85.4 ± 0.5 ka BP. The age of cave pearls is Holocene (7.4 ± 2.1 ka BP). Stalagmite sample has not been dated due to low U contents and inferred «open system» behavior of U and Th isotopes.

Key words: caves, mineralogenesis, isotopic composition, geochronology, paleoclimate.

ВВЕДЕНИЕ

Пещера Старателей была обнаружена М. Цыганко и обследована в мае 2011 г. спелеологами Казани и Екатеринбургa. Пещера расположена на левом берегу р. Сосьва, в 3 км выше по течению от устья р. Калья. Длина пещеры составляет около 600 м (Орлов и др., 2011). Несмотря на небольшую длину, пещера является одной из самых больших по объему (более 17.5 тыс. м³) под-

земных полостей Свердловской области. Нижние этажи пещеры непосредственно связаны с р. Сосьва и являются каналами, по которым осуществляется переток поверхностных и подземных вод (Орлов и др., 2011). В морфологическом отношении пещера относится к горизонтальным пещерам со входами, расположенными на разных высотных уровнях. Пещера находится в коридорно-речной и периодически водной стадиях развития (Максимович, 1969).

Вход в пещеру расположен на высоте 9 м от уровня реки, в борту известнякового массива высотой до 40 м. Входной канал имеет треугольное сечение и высоту до 4 м, ширину в нижней части — до 2.5 м. Он обрывается семи-метровым уступом и выходит в Центральный грот – самый объемный грот пещеры. В зимний период через вход в пещеру попадает снег, который в дальнейшем трансформируется в зернистый фирн или лед, не стаивающий полностью даже летом. В центральной части грота расположен большой глыбовый завал. Обрушенные плиты вблизи стен в южной части грота перекрыты глинистыми отложениями, в которых встречаются костные остатки млекопитающих позднего плейстоцена (бизона, шерстистого носорога, северного оленя и др.; неопубликованные данные, определение П. А. Косинцева, ИЭРиЖ УрО РАН), предположительно относящиеся к микулинскому межледниковью (морская изотопная стадия MIS5e). По-видимому, глинистые отложения с костными остатками были замыты в пещеру через верхние (в настоящее время недоступные) входы-трещины с поверхности карстового массива.

В период с августа 2016 по июль 2017 г. проводился мониторинг температуры воздуха в Центральном гроте (даталоггер HOBO Water Temp Pro v2; погрешность измерения 0.1 °C; измерения с часовым интервалом; рис. 1).

Максимальная температура в гроте была зафиксирована 25 августа 2016 г. (при температуре на поверхности по данным метеостанции г. Североуральска 29 °C) и составила 12.3 °C, минимальная — -5.8 °C была зарегистрирована 12 февраля 2017 г. (при температуре на поверхности по данным метеостанции г. Североуральска -33 °C). Полученный годовой ход температур указывает на регулярное замерзание и оттаивание водных растворов в этой части пещеры, что приводит к формированию минеральных отложений различного генезиса.

Методы исследования. Изучение морфологии и химического состава новообразованных пещерных минералов проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодиспер-

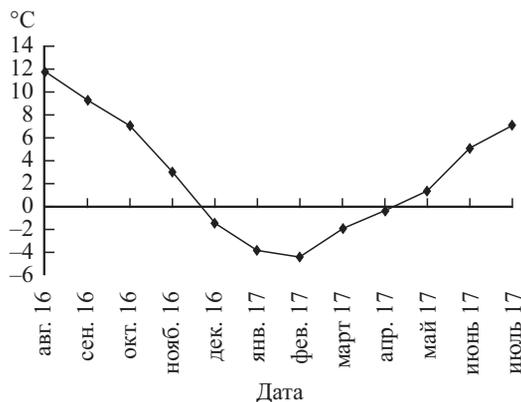


Рис. 1. Ход температуры воздуха в Центральном гроте пещеры Старателей.

Fig. 1. Time series of air temperature (monthly averages) in the Central grotto of the Starateley cave.

сионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 в Горном институте УрО РАН (аналитик О. В. Коротченкова). Изотопные анализы углерода и кислорода выполнялись в Innsbruck Quaternary Group при Инсбрукском университете (руководитель — академик Австрийской академии наук, профессор К. Шпетль) на масс-спектрометре Delta V (Thermo Fisher Scientific), оснащённом автоматической линией для анализа карбонатов на основе интерфейса GASBENCH (Spötl, Vennemann, 2003).

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -датировки были выполнены методом масс-спектрометрии с термической ионизацией (TIMS). Изотопы U-серии были измерены на масс-спектрометре MAT 262 RPQ TIMS в университете г. Шьян (Китай, руководитель Н. Cheng). Все коэффициенты активности были вычислены при помощи констант радиоактивного распада (Cheng et al., 2000) и скорректированы по детритовому Th, предполагая, что кларковое соотношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ для детритового материала равно 3.8, и ^{234}U и ^{238}U находятся в вековом равновесии. Абсолютные даты указаны в тыс. лет назад (от 1950 г.).

Минералогическое описание и морфология спелеотем. С поверхности плит и стен в Центральном гроте для исследования нами были отобраны 4 пробы пещерных отложений (рис. 2). Сталагмит (проба 1) был отобран с западной стены Центрального грота пещеры (рис. 3, а). Натечные образования в гроте выглядят специфично, у них рыхлая корродированная поверхность и

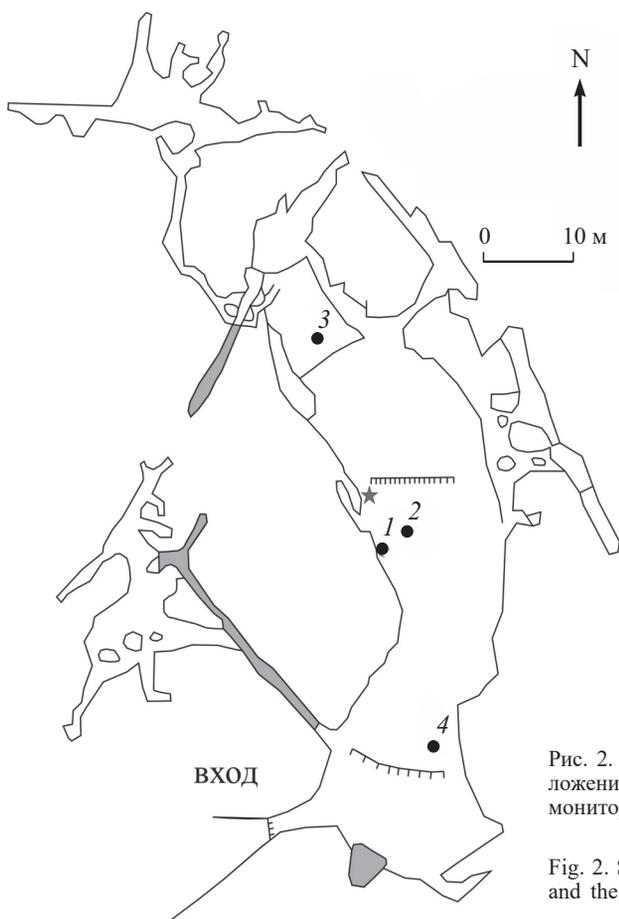


Рис. 2. Места отбора образцов пещерных отложений (кружки) и расположение станции мониторинга температуры (указано звездочкой) на плане пещеры.

Fig. 2. Sampling sites of cave deposits (circles) and the location of the temperature monitoring station (star) on the cave plan.



Рис. 3. Общий вид карбонатных образований в местах отбора проб: *a* — сталагмит (проба 1); *б* — агрегаты кальцита двух видов: на поверхности камней кальцит светло-желтой окраски, сверху перекрыт белыми корочками и слоями сферолитовых образований (проба 2); *в* — сферолиты кальцита (проба 3); *г* — кальцитовый порошок на поверхности камней (проба 4).

Fig. 3. General view of carbonate formations in situ at the sampling sites: *a* — stalagmite (sample 1); *б* — calcite aggregates of two types: on the surface of stones, calcite is light-yellow in color, overlain by white crusts and layers of spherulites (sample 2); *в* — calcite spherulites (sample 3); *г* — powdery calcite on the surface of rock fragments (sample 4).

белый цвет. Очевидно, это связано с замерзанием воды на сталагмите и прекращением роста кальцита в зимнее время, когда в гроте фиксируются отрицательные температуры (см. рис. 1).

Проба 2 была отобрана на поверхности плоской глыбы известняка и состояла из двух типов кальцита. Верхний слой представлен сферолитами белого цвета (пещерный жемчуг), состоящими из плоскогранных ромбоэдрических индивидов, расщепленных на концах (рис. 4, *a*, *б*). Размер сферолитов достигает 5 мм. Некоторые сферолиты сцементированы более поздней новообразованной кальцитовой коркой (рис. 4, *в*, *д*), иногда вместе с обломками костей летучих мышей (рис. 4, *г*). Ниже находятся рыхлые скопления кристаллов кальцита светло-желтой окраски. В основном это корочки кальцита с плоским основанием, которые состоят из разноориентированных ромбоэдрических кристаллов с различной степенью расщепления, иногда до сферолитов (рис. 5). Размер светло-желтых агрегатов достигает 4—5 мм. Проба 3 состоит из белых сферолитов кальцита со схожей морфологией (рис. 4, *a*, *б*).

Проба 4 была отобрана на поверхности глыб известняка и представлена мучнистым порошком (кальцитовой «мукой»). Отдельные ромбоэдрические кристаллы кальцита размером от 5 до 25 мкм имеют разную степень расщепления, а срастаясь, формируют корочки с плоским основанием размером 100—150 мкм (рис. 6).

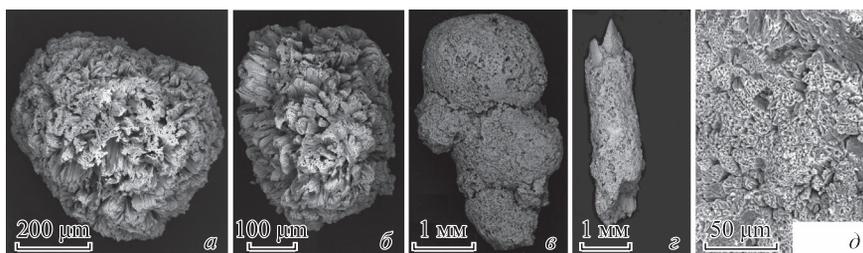


Рис. 4. Морфология сферолитового кальцита белого цвета из проб 2 и 3: *a*, *б* — строение пещерного жемчуга; *в*—*д* — новообразованная кайма, обрастающая сферолиты и костный детрит. Фотографии под электронным микроскопом.

Fig. 4. The morphology of white calcite spherulites in samples 2 and 3: *a*, *б* — individual cave pearls; *в*—*д* — younger crust, coating spherulites and bone detritus. SEM microphotographs.

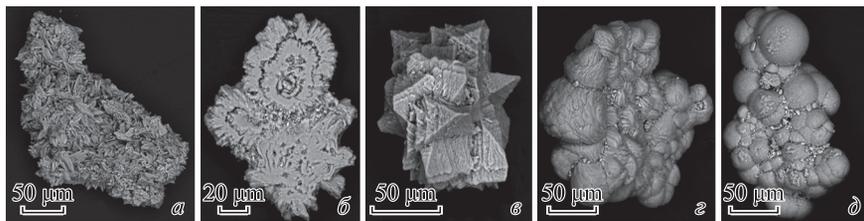


Рис. 5. Морфология выделений кальцита светло-желтой окраски из пробы 2: *a* — корочка, сложенная разноориентированными кристаллами; *b* — плоское основание срастания сферолита и корочки; *c* — сросток блоковых кристаллов; *z* — агрегат расщепленных кристаллов; *d* — сферолитовый агрегат. Фотографии под электронным микроскопом.

Fig. 5. The morphology of calcite with light-yellow color from sample 2: *a* — crust comprising variously oriented crystals; *b* — flat base of the spherulite-crust aggregate; *c* — intergrowth of blocky crystals; *z* — aggregate of intergrown split crystals; *d* — spherulitic aggregate. SEM microphotographs.

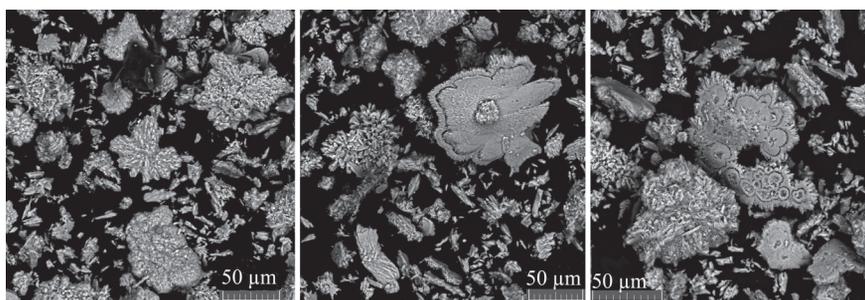


Рис. 6. Морфология кристаллов и агрегатов кальцита из пробы 4. Фотографии под электронным микроскопом.

Fig. 6. The morphology of the crystals and aggregates of calcite from sample 4. SEM microphotographs.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав новообразованных минералов. Для характеристики химического состава всего было выполнено 32 анализа минеральных образований, в том числе из муки — 17, пещерного жемчуга — 6, и кальцита светло-желтого — 9.

Наиболее «чистым» является кальцит пещерного жемчуга, поскольку в нем не выявлено примесей S и Mg (рис. 7, *б*). Кальцитовая мука содержит небольшую примесь серы (до 0.03 ат. %) (рис. 7, *а*), а в кальците светло-желтой окраски зафиксировано незначительное (до 0.02 ат. %) содержание магния и серы (рис. 7, *в*). Наличие малых элементов в кальците характеризует микроклиматические и гидрохимические условия минералообразования (соотношение Mg/Ca в растворах, щелочность, величина pH, температура и др.).

Изотопный состав кислорода и углерода. Изотопный состав C и O кальцитовой муки, жемчуга и кальцита светло-желтой окраски сравнивали с изотопным составом натечного кальцита (сталагмита), отобранного в том же зале пещеры. Всего было выполнено 30 анализов по оси роста сталагмита с шагом 1 мм, 14 анализов кристаллов кальцита светло-желтой окраски, 3 анализа пещерного жемчуга и 1 анализ кальцитовой муки. Изотопный анализ углерода и кислорода сталагмита дал значения $\delta^{18}\text{O}$ от -9.5 до -13.0 ‰ VPDB и $\delta^{13}\text{C}$

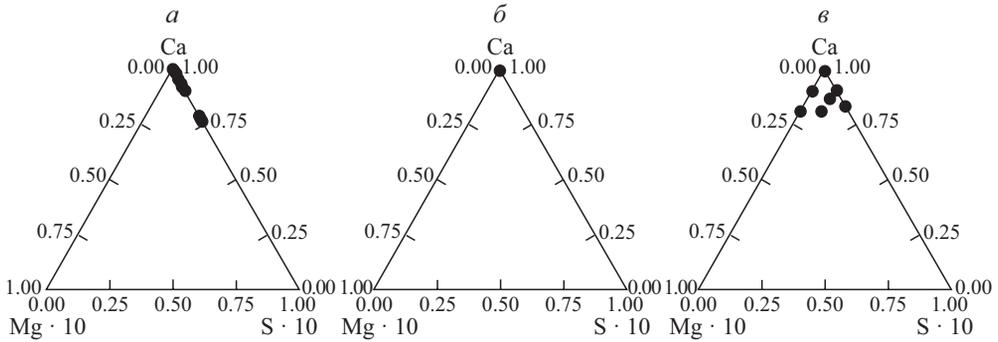


Рис. 7. Соотношение кальция, магния и серы (атомное количество) в кальцитовой муке (а), пещерном жемчуге (б) и кальците светло-желтой окраски (в).

Fig. 7. The ratio of Ca, Mg and S (atomic) in calcite flour (a), cave pearls (b) and light-yellow calcite (c).

от -4.4 до -7.9 ‰ VPDB (аналитическая погрешность на уровне 1σ составляет 0.1 ‰ для обоих изотопов). Кальцит светло-желтой окраски по сравнению с натечным кальцитом, мукой и жемчугом имеет облегченный изотопный состав кислорода (на 4 — 5 ‰) и более тяжелый состав углерода (на 5 — 7 ‰, рис. 8).

Облегченный, по сравнению с натечным кальцитом, состав кислорода, а также более тяжелый состав углерода, зафиксированный в кальците светло-желтой окраски, дает основание отнести его к криогенным минералам, образованным при медленном замерзании и ограниченной дегазации CO_2 (Žak et al., 2018). Такие условия реализуются в пещерах на этапе деградации (протаивания) многолетней мерзлоты. Изотопный состав С и О кальцитовой муки и пещерного жемчуга практически не отличается от изотопного состава натечных отложений.

Th/U-датирование карбонатных образований. Кальцит светло-желтой окраски дал возраст 85.4 ± 0.5 тыс. лет, что соответствует относительно крат-

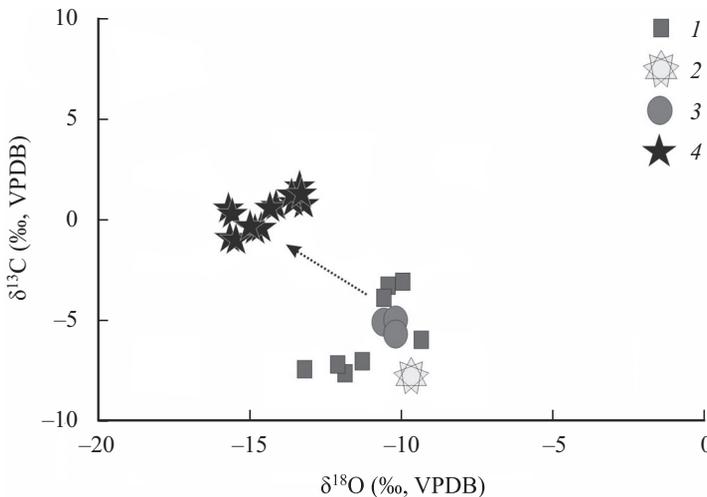


Рис. 8. Изотопный состав сталагмита (1), кальцитовой муки (2), пещерного жемчуга (3) и кальцита светло-желтой окраски (4).

Fig. 8. Isotopic composition of stalagmite (1), calcite flour (2), cave pearls (3) and light yellow calcite (4).

Результаты $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -датирования карбонатных образований из пещеры Старателей

Results of $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -dating of carbonates from the Staratelay cave

№	Образец	^{238}U , ppb	^{232}Th , ppb	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	Возраст без коррекции, тыс. лет	Возраст с коррекцией, тыс. лет	Относительная ошибка, %
1	Пещерный жемчуг	24.2 ± 0.1	2466 ± 50	0.1076 ± 0.0135	9.835 ± 1.295	7.366 ± 2.120	28.79
2	Криогенный кальцит светло-желтой окраски из пробы 2	3095 ± 5.0	52862 ± 1061	0.6790 ± 0.0018	85.837 ± 0.393	85.382 ± 0.478	0.56

космическому периоду потепления — интерстадиалу (GI21) морской изотопной стадии MIS5 плейстоцена (см. таблицу).

Криогенный кальцит, образованный в периоды интерстадиалов, был выявлен и описан авторами в 12 пещерах Северного, Среднего и Южного Урала (Чайковский и др., 2014; Dublyansky et al., 2018). Во время потеплений происходило протаивание многолетнемерзлых пород настолько, что верхняя граница мерзлоты опускалась до свода пещеры. Вода поступала в пещеру, все еще находящуюся в зоне отрицательных температур, и замерзала. При дальнейшем потеплении, когда температура в пещере поднималась до $\sim 0^\circ\text{C}$, медленное замерзание инфильтрационной воды в небольших «бассейнах» приводило к криогенной концентрации остаточного раствора и образованию кальцита.

Пещерный жемчуг дал голоценовый возраст (7.4 ± 2.1 тыс. лет). Большая погрешность (28.9 %) объясняется низким содержанием урана и загрязнением детритальным торием.

Датировка сталагмита была признана нецелесообразной после петрографического изучения образцов, указавшего на высокую вероятность геохимической открытости системы (вынос урана из кальцита).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Криогенное происхождение кальцита светло-желтой окраски из пробы 2 установлено на основании характерной морфологии кристаллов и агрегатов, а также характерного смещения изотопного состава (облегчение O, утяжеление C) относительно «обычных» натеков пещеры. Находка криогенного кальцита, который формировался при таянии многолетнемерзлых пород, свидетельствует об условиях микроклиматически закрытой карстовой системы в это время. Следует полагать, что во время образования этого кальцита, вход в пещеру был значительно меньше, чем в настоящее время, либо полностью отсутствовал. Температура в этой части пещеры была относительно стабильной и контролировалась не адвективным теплопереносом (охлаждение пещеры, связанное с сезонным поступлением холодного воздуха и снега), а кондуктивным — через толщу пород в условиях многолетней мерзлоты. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -датирование кальцита позволило установить время, по крайней мере, одного эпизода деградации многолетней мерзлоты в результате потепления климата на восточном склоне Северного Урала (85.4 ± 0.5 тыс. лет назад).

Благодаря широкому диапазону температур воздуха (от -5.8°C до 12.3°C) пещера, а в особенности ее объемная привходовая часть, может служить мо-

дельным полигоном для изучения процессов современного минералообразования (при изменяющихся в течение года фациальных обстановках).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-55-14002 «Миграция границы многолетней мерзлоты на границе Европа-Азия в плейстоцене» и гранта FWF № I027070 «Pleistocene permafrost boundary shifts at the Europe-Asia border».

Список литературы

Максимович Г. А. Некоторые вопросы морфометрии карстовых полостей / Вопросы карстоведения. Пермь, **1969**. С. 137—143.

Орлов О. Л., Цурихин Е. А., Васильев С. Н. Дальнейшие исследования пещер Сосьвинского подрайона Североуральского спелеологического района // Спелеология и спелестология. **2011**. № 2. С. 62—63.

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.

References

Chaykovskiy I. I., Kadebskaya O. I., Žak K. Morphology, composition, age and nature of carbonate spherulites from the caves of the Western Urals. *Geochem. Int.* **2014**. N 4. P. 336—337.

Cheng H., Edwards R. L., Hoff J., Gallup C. D., Richards D. A., Asmerom Y. The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chem. Geol.* **2000**. Vol. 169, N 1—2. P. 17—33.

Dublyansky Y., Kadebskaya O., Koltai G., Töchterle P., Spötl C. Cryogenic cave calcites reveal dynamic response of Eurasian permafrost to Late Pleistocene climate change. In: *VIII International Workshop on Ice Caves, Potes, Picos de Europa, Spain*. **2018**. P. 57.

Maksimovich G. A. Some questions on the morphometry of karst cavities. In: *Issues of karst studies*. Perm, **1969**. P. 137—143 (in Russian).

Orlov O. L., Tsurikhin E. A., Vasilyev S. N. Further studies of the caves of the Sosvinsky subdistrict of the Severouralsk speleological region. *Speleology and Speleostology*. **2011**. N 2. P. 62—63 (in Russian).

Spötl C., Vennemann T. W. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **2003**. Vol. 17. P. 1004—1006.

Žak K., Onac B. P., Kadebskaya O. I., Filippi M., Dublyansky Y., Luetscher M. Cryogenic mineral formation in caves. In: *Part 6 of book «Ice Caves»* A. Persoiu and S.-E. Lauritzen (eds). Amsterdam; Cambridge: Elsevier, **2018**. P. 123—162.

Поступила в редакцию
22 октября 2018 г.