

## Характеристика криогенного кальцита из пещеры Грандиозная (им. В. А. Ануфриева), Южный Урал

© 2018. О. И. Кадебская<sup>1,2</sup>, д. г. н., зав. лабораторией, доцент,  
Ю. В. Дублянский<sup>3</sup>, к. г.-м. н., н. с.,

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН,

614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78 а,

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15,

<sup>3</sup> Институт геологии Инсбрукского университета,  
6020, Инсбрук, Австрия, ул. Иннрайн, 52,

e-mail: icecave@bk.ru

Открытая в 1999 г. пещера Грандиозная в республике Башкортостан является одной из крупнейших естественных карстовых полостей Урала. Спелеологическое исследование пещеры ведётся силами Салаватского клуба спелеологов (республика Башкортостан). В 2016 г. в пещере как на крупных глыбах, так на глинистом дне были обнаружены необычные кальцитовые образования, лежащие в свободном пространстве. При помощи температурного даталоггера HOBO Water Temp Pro v2 было установлено, что в гроте, где был найден кальцит, в течение всего года наблюдаются стабильные положительные температуры (колебания не превышают 0,5 °C). На основании морфологического, химического и изотопного изучения образцов, а также их <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U датирования был сделан вывод о том, что этот кальцит является криогенным. Корочки представляют собой агрегаты (размером до 6 см) разноориентированных кристаллов кальцита с примазками глины. Тональность окраски корочек зависит от количества глинистых частиц. Находка такого кальцита, образовавшегося на переходе от позднего дриаса к пребореалу, указывает на существование в это время на Южном Урале деградирующей многолетней мерзлоты. Во время этого, довольно резкого, потепления климата, происходило активное протаивание существовавшей ранее мерзлоты, что является необходимым условием для образования криогенного кальцита в пещерах. Разрабатываемая авторами методика определения криогенного кальцита и других морфологических форм, оставшихся после полной деградации подземных наледей, позволяет оценивать масштабы оледенения и величину его влияния на карстовые экосистемы в пределах изучаемого региона.

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

## Characteristics of cryogenic calcite from cave Grandioznaya (V. A. Anufrieva), Southern Ural

© 2018. O. I. Kadetskaya<sup>1,2</sup>, Y. V. Dublyansky<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch of the RAS,  
78 a Sibirskaya St., Perm, Russian, 614007,

<sup>2</sup> Perm State National Research University,  
15, Bukireva St., Perm, Russian, 614990,

<sup>3</sup> Leopold Franzens Universit t Innsbruck (LFUI),  
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Austria,

e-mail: icecave@bk.ru

Cave Grandioznaya, discovered in 1999 in Republic Bashkortostan is one of the largest natural caves in Ural Mountains. Speleological research of the cave is conducted by the Salavat club of speleologists (Republic of Bashkortostan). Unusual calcite formations were found in the cave in 2016, as on large blocks, and on a clay bottom in free space were discovered. Using the temperature data logger HOBO Water Temp Pro v2, it was found that stable positive temperatures are observed throughout the year in the grotto where calcite was found (fluctuations do not exceed 0.5 °C). On the basis morphological, chemical and stable isotope studies, as well as the <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U dating, this calcite was found to be of cryogenic origin. Crusts are aggregates (up to 6 cm in size) of differently oriented calcite crystals with clay primers. The color tone of the crusts depends on the amount of clay particles. Finding of such calcite, formed on the transition from Younger Dryas to the Preboreal stage of the Holocene epoch is indicative of the presence of degrading permafrost in this part of Ural at the time. During this, rather sharp, warming of the climate, an active thawing of the permafrost existed, which

is a prerequisite for the formation of cryogenic calcite in caves. Methods of identification of cryogenic calcite, as well as other speleothems that remained after disappearance of underground ice, developed by the authors allows assessing the extent of ancient permafrost and its effect on karst ecosystems in the study region.

**Keywords:** carbonates, caves, cryogenesis, isotope composition, geochronology, paleoclimate.

Экологическая минералогия и геохимия в настоящее время рассматривается как одно из самых важных формирующихся направлений развития геоэкологии [1]. Относительная изолированность пещер, стабильность температурных условий и широкое распространение карстовых полостей в пределах Урала, а также великолепная сохранность сформировавшихся минеральных образований делает их уникальными объектами для выявления специфики проявления геохимических процессов, позволяющих проследить геохронологические записи климатических событий на протяжении четвертичного периода [2]. Актуальность исследований обусловлена выявлением в последние годы комплекса изотопно-геохимических [3], минералогических [4] и биологических [5] индикаторов значительных температурных колебаний.

Криогенный пещерный кальцит образуется в пещерах из водного раствора, поступающего с поверхности, при его медленном замерзании в условиях отрицательных температур, сохраняющихся в пещерной полости в толще многолетнемерзлых пород. Такие условия складываются на этапе деградации многолетней мерзлоты, когда в результате потепления климата мощность активного слоя увеличивается настолько, что верхняя граница мерзлоты пересекает поверхность пещеры. При этом вода из активного слоя может попадать в залы пещеры, всё ещё находящиеся в зоне отрицательных температур, и замерзать. Поскольку возраст такого кальцита может быть достаточно точно определён методом  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  датирования, он является уникальным источником информации для восстановления пространственного распространения многолетней мерзлоты на протяжении последних 600 тыс. лет [6]. На территории России криогенный кальцит был впервые описан в границах Северного и Среднего Урала в пещерах Дивья, Российская и Усьвинская-1 [7]. На Южном Урале криогенный кальцит был обнаружен в пещерах Виктория и Шульган-Таш [6]. В настоящей статье представлены результаты изучения и датирования предположительно криогенного кальцита, найденного в третьей пещере Южного Урала – Грандиозной.

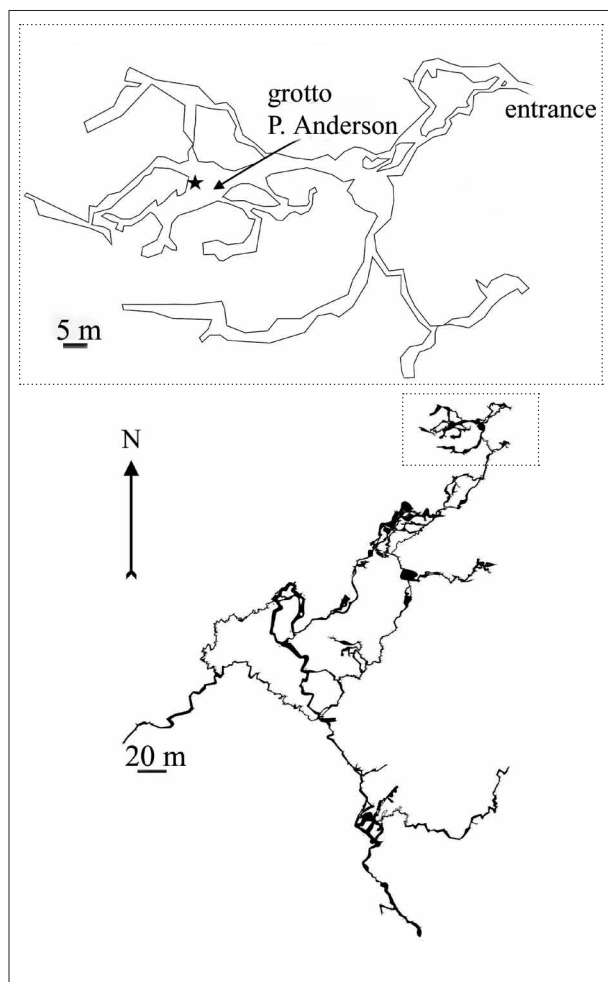
### Общие сведения о пещере Грандиозная.

Пещера была найдена В. Александровым в 1999 г. Спелеологическое исследование пещеры ведётся силами Салаватского клуба спелеологов (республика Башкортостан). Благодаря усилиям спелеологов, пещера сохраняется в практически неизменном виде. Натечные и другие пещерные отложения не затоптаны, а в некоторых местах огорожены.

Пещера находится в Мелеузовском районе республики Башкортостан, в 32 км от д. Верхотор, на правом берегу р. Урюк, правого притока р. Нугуш, на абсолютной высоте около 450 м н. у. м. На сегодняшний день, пещера имеет протяжённость 7181 м и глубину 189 м [8].

Полость образована в известняках верхнекарбонового возраста ( $C_3$ ), представленных двумя разностями: битуминозными известняками от тёмно-серого до чёрного цвета (в этих породах заложена верхняя, привходовая часть пещеры) и органогенными известняками светло-серого цвета с большим количеством ископаемой фауны (в этих породах заложена большая часть пещеры, начиная с конца основного меандра и до самых нижних ходов пещеры). Известняки слоистые, падают на север под углом  $100^\circ$ . В пещере встречаются пласты и линзы кремнистых пород, имеющих серо-синюю и коричневую окраску. В 200–300 м к востоку от пещеры верхнекарбоновые известняки контактируют с осадочными породами нижнедевонского возраста ( $D_1$ ), которые представлены песчаниками и кварцито-песчаниками. Залегание пород несогласное; их контакт, по всей видимости, имеет тектонический характер [8]. Вход в пещеру Грандиозная расположен в воронке-поноре глубиной 14 м, замыкающей собой лощину, длиной около 300 м, в которой прослеживается русло временного водотока. Во время весеннего снеготаяния или сильных дождей вход в пещеру становится местом интенсивного поглощения поверхностных вод. Пещера имеет сложную морфологию (рис. 1) и относится к коррозионно-эрозионному типу.

Наклонные и вертикальные участки полости сменяются системой практически горизонтальных ходов. Сложный морфологический облик пещеры обусловлен наложением более молодых карстовых каналов на систему древ-



**Рис. 1.** План пещеры Грандиозная [8]. На врезке показана привходовая часть пещеры. Звёздочкой указано место находки криогенного кальцита  
**Fig. 1.** Schematic map of Grandioznaya cave [8]. Star indicates the location of cryogenic calcite

них. Входной меандр обрывается 12-метровым уступом, который выводит в зал Афродиты и верхнюю часть зала Памелы Андерсон, где и был обнаружен исследуемый в настоящей работе кальцит. Залы являются частями древних горизонтальных галерей пещеры, которые располагаются на глубине 50–58 м от поверхности.

Нижняя часть зала Памелы Андерсон является горизонтальной галереей, расположенной на глубине 70–76 м, вскрытой при обрушении пород перемычки между верхним и нижним ярусами пещеры. В результате обрушения и объединения галерей, грот имеет внушительный объём и является одним из самых больших залов пещеры. На дне зала расположен глыбовый завал [8]. Глыбы завала покрыты слоем глины, в большом количестве встречаются натечные коры, сталагмиты (рис. 2 d, см. обложка,

с. 3.), между которыми наблюдаются светлые скопления необычных корочкообразных агрегатов кальцита (рис. 2 a, b, см. обложка, с. 3), в некоторых местах частично перекрытых натечной корой (рис. 2 с, см. обложка, с. 3). Площадь индивидуальных скоплений не превышает 2–3 м<sup>2</sup>, мощность – 3–4 см. Такие формы нахождения в пещерах типичны для криогенного кальцита [9].

### Материалы и методы исследования

Изучение морфологии и химического состава криогенных кальцитовых корок проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного 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. Шпётль) на масс-спектрометре Delta PLUS XL (Fisher Scientific), оснащённом автоматической линией для анализа карбонатов на основе интерфейса GASBENCH (Fisher Scientific) по методике изложенной в работе [10].

<sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U датировки были выполнены методом масс-спектрометрии с термической ионизацией на масс-спектрометре MAT 262 RPQ TIMS в университете г. Шьян (Китай, руководитель Х. Ченг). Все коэффициенты активности были вычислены при помощи постоянных радиоактивного распада по [3].

**Морфологические наблюдения.** Изучаемый кальцит в пещере представлен корочками светло-коричневой окраски (рис. 3 a, см. обложка, с. 3). Корочки представляют собой агрегаты (размером до 6 см) разноориентированных кристаллов кальцита с примазками глины. Тональность окраски корочек зависит от количества глинистых частиц. Наблюдения под электронным микроскопом показали, что рост кальцита происходил на загрязнённых глиной поверхностях, и глинистые частицы активно захватывались растущими агрегатами (рис. 3 f, см. обложка, с. 3). В большинстве случаев, корочки имеют плоское основание (рис. 3 с, см. обложка, с. 3), причём в основании некоторых (рис. 3 d, e, см. обложка, с. 3) наблюдаются отпечатки кристаллов ныне не существующей минеральной фазы (льда?). Наличие таких отпечатков было описано ранее для образцов криогенного кальцита Среднего

и Северного Урала [7], и может рассматриваться, как типологический признак криогенного кальцита.

Корочки-агрегаты сложены индивидами, часто демонстрирующими расщеплённый рост, вплоть до появления сноповидной морфологии (рис. 3 б, см. обложка, с. 3). Нерасщеплённые индивиды образованы гранями острого ромбоэдра и пинакоида; иногда встречаются комбинации острого и нормального (спайного) ромбоэдров. Размер отдельных индивидов составляет 100–150 мкм.

**Примеси.** По данным полуколичественного рентгеноспектрального микроанализа в кальците зафиксирована примесь серы ( $\text{SO}_3$  – до 1,71 мол. %). Выявленные в образцах содержания Si (до 3,26 ат. %), Al (до 2,57 ат. %), K (до 0,83 ат. %), Mg (до 0,47 ат. %) и Fe (до 0,63 ат. %) связаны с присутствием микровключений глинистых минералов и гидроксидов железа.

**Изотопный состав кислорода и углерода.** Изотопный анализ углерода и кислорода кальцита корочек дал значения  $\delta^{18}\text{O} = -13,7\text{‰}$  V-PDB и  $\delta^{13}\text{C} = -7,8\text{‰}$  V-PDB (аналитическая погрешность для обоих изотопов составляет 0,1‰ на уровне  $1\sigma$ ). Для сравнения был проанализирован изотопный состав сталагмита, отобранного в том же зале пещеры. 88 анализов, выполненных по оси роста сталагмита с шагом 1 мм, дали незначительно изменяющиеся значения  $\delta^{18}\text{O} = -10,8 \pm 0,3\text{‰}$  V-PDB и  $\delta^{13}\text{C} = -8,3 \pm 0,6\text{‰}$  V-PDB.

**$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  датирование.** Исследуемый кальцит дал возраст около 11,9 тыс. лет (табл.). Довольно большая аналитическая ошибка, превышающая 1 тыс. лет (9,9%) связана с невозможностью полностью очистить образец от глинистых частиц, захватывавшихся

в процессе образования агрегата. Сталагмит, выросший на глыбе в гроте Памелы Андерсон начал расти около 2,6 тыс. лет назад, и рост продолжался, практически до момента отбора образца (кальцит на глубине несколько миллиметров от поверхности сталагмита имеет возраст около 80 лет).

### Результаты и их обсуждение

Поскольку наличие криогенного кальцита в пещере Грандиозная является важным индикатором присутствия многолетней мерзлоты на Южном Урале в конце плейстоцена (в конце позднего дриаса), следует оценить насколько надёжно определён генезис этого кальцита.

При помощи температурного даталоггера НОВО Water Temp Pro v2 было установлено, что в гроте, где был найден кальцит, в течение всего года наблюдаются стабильные положительные температуры (колебания не превышают  $0,5^\circ\text{C}$ , рис. 4). Таким образом, в этой части пещеры современное оледенение, связанное с локальным накоплением холода или динамическим промораживанием пещеры, развиваться не может. Соответственно в современных или близким к современным, условиях невозможно и образование криогенного кальцита. Несмотря на это обстоятельство, большинство характеристик исследуемого кальцита соответствуют криогенному генезису. Такими характеристиками являются:

- характер нахождения в пещере (в виде небольших по площади скоплений малой мощности, обычно приуроченных к крупным залам пещеры);
- нахождение в местах в пещере, где возможно существование малых водоёмов, а именно на крутых глиняных склонах (в таких

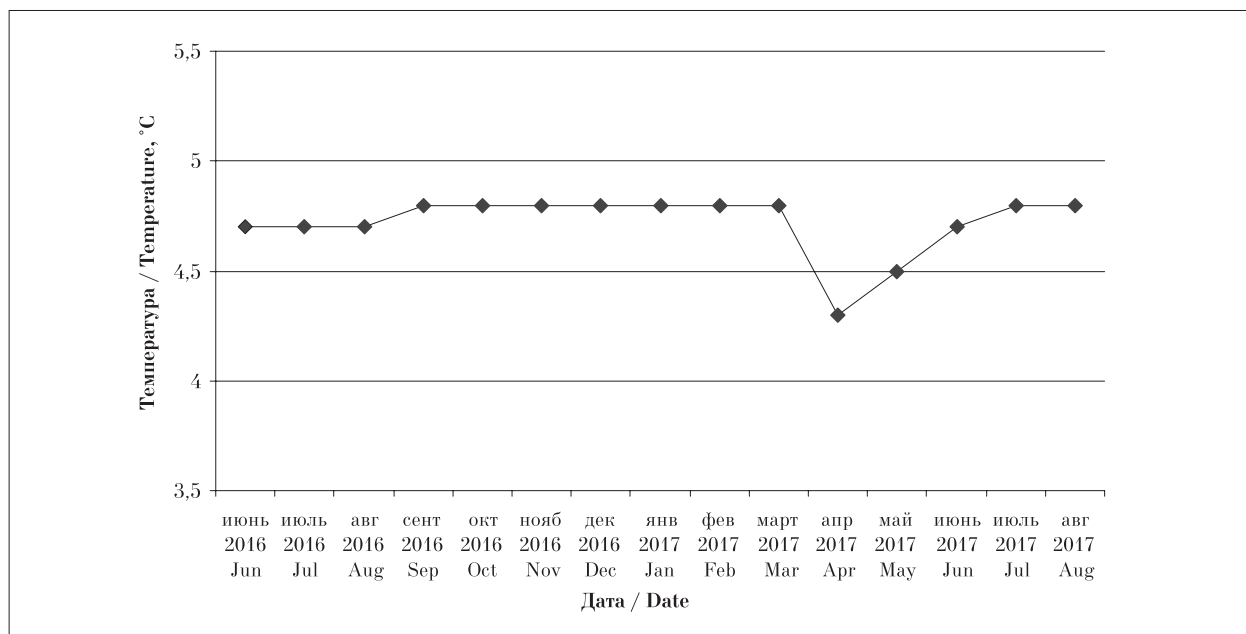
Таблица / Table

Результаты  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  датирования карбонатной корочки и сталагмита из пещеры Грандиозной  
Results of  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dating of the carbonate crusts and the stalagmite from Grandioznaya cave

№	Sample	$^{238}\text{U}$ primary, ppm*	$^{232}\text{Th}$ , ppt**	$^{230}\text{Th} / ^{238}\text{U}$	Age uncorrected, years	Age corrected, years	Relative error, %
1	Cryogenic calcite	$8,15 \pm 0,05$	$572920 \pm 12130$	$0,1459 \pm 0,0110$	$13615 \pm 120$	$11895 \pm 175$	9,9
2	Stalagmite (base)	$1,66 \pm 0,01$	$3082794 \pm 31997$	$32,58 \pm 0,30$	$2683,0 \pm 16,4$	$2644,2 \pm 25,7$	1,0
3	Stalagmite (vertex)	$1,020 \pm 0,006$	$273957 \pm 5059$	$0,9724 \pm 0,0745$	$83,0 \pm 7,7$	$83,0 \pm 5,3$	6,4

Примечание: \*ppt – одна миллионная часть величины или  $10^{-6}$  значения величины; \*\*ppt – одна триллионная часть величины или  $10^{-12}$  значения величины.

Note: \*ppt – parts per million, or  $10^{-6}$  of value; \*\*ppt – parts per trillion, or  $10^{-12}$  of value.



**Рис. 4.** Ход температуры воздуха в гроте П. Андерсон с июня 2016 г. по сентябрь 2017 г. Среднемесячные значения рассчитаны по массиву измерений, выполнявшихся с временным шагом в 30 мин. Погрешность измерения  $\pm 0,1$  °C.

**Fig. 4.** Air temperature in the “Hall of P. Anderson” between June 2017 and September 2017. Shown monthly means were calculated from data obtained at 30 min-resolution. Analytical error is  $\pm 0.1$  °C

водоёмах можно представить образование схожих корочек кальцита – рафтов);

- характер и морфология минеральных агрегатов (несцементированные между собой корки и зёрна; наличие «отпечатков» минеральных фаз, присутствовавших при кристаллизации, но впоследствии исчезнувших);

- наличие в составе кальцита примеси серы, что характерно для криогенного кальцита других районов Урала;

- особенности кристаллизации (частая встречаемость расщеплённого роста кристаллов).

Один из наиболее надёжных критериев, изотопный, не даёт однозначного подтверждения криогенного генезиса кальцита из пещеры Грандиозной. По сравнению с обычными натёками, образующимися в той же географической зоне, криогенный кальцит должен иметь облегчённый изотопный состав кислорода, а также более «тяжёлый» состав углерода [11]. Это связано с механизмом образования криогенного кальцита при медленном вымерзании растворов, приводящем к фракционированию изотопов кислорода между льдом и остаточным раствором, а также с режимом дегазации CO<sub>2</sub> [12].

Несмотря на то, что исследуемый кальцит облегчён по отношению к кальциту голоценового сталагмита по  $\delta^{18}\text{O}$  (на 3‰) и утяжелён по  $\delta^{13}\text{C}$  (на 0,5‰), что соответствует криогенному механизму роста, следует отметить, что схожие

абсолютные значения  $\delta^{18}\text{O}$  были получены и для некриогенного (сталагмитового) кальцита из Киндерлинской пещеры (Южный Урал), образовавшегося приблизительно в то же время, что и кальцит, исследуемый в данной работе [13].

Более негативные значения  $\delta^{18}\text{O}$  сталагмита из Киндерлинской пещеры объясняются более холодным, по сравнению с голоценом, климатом позднего дриаса.

Важным, хотя и косвенным, аргументом в пользу криогенного происхождения исследуемого кальцита из пещеры Грандиозной является его возраст. Он соответствует, в рамках ошибки датирования, переходу от холодных условий позднего дриаса к значительно более тёплым условиям пребореала. Во время этого, довольно резкого, потепления климата, происходило активное протаивание существовавшей ранее мерзлоты, что является необходимым условием для образования криогенного кальцита в пещерах. Время образования большинства образцов криогенного кальцита, найденного в других пещерах Урала, также приурочено к переходам от холодных интерстадиалов к более тёплым стадиалам [14, 15].

### Заключение

На основании изучения необычных корок кальцита, отобранных в пещере Грандиозная,



а также его Th-U датирования мы пришли к выводу о том, что этот кальцит является криогенным. Находка криогенного кальция, образовавшегося на переходе от позднего дриаса к пребореалу указывает на существование в это время на Южном Урале многолетней мерзлоты.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-55-14002 «Миграция границы многолетней мерзлоты на границе Европа-Азия в плейстоцене» и гранта FWF № 027070 (Австрия) «Pleistocene permafrost boundary shifts at the Europe-Asia border».*

### Литература

1. Гавриленко В.В. Экологическая минералогия и геохимия в структуре наук о Земле // Российское минералогическое общество глазами современников: Сборник статей по истории геологических знаний. Санкт-Петербург: Российское минералогическое общество, 2015. С. 72–84.

2. Кадебская О.И. Минеральные и геохимические индикаторы природных процессов в подземных карстовых ландшафтах Урала: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Пермь: ПГНИУ, 2017. 39 с.

3. 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. V. 169. No. 1–2. P. 17–33.

4. Андрейчук В., Галускин Е. Криоминеральные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь. 2001. Вып. 27–28. С. 108–116.

5. Фадеева Т.В., Косинцев П.А., Кадебская О.И., Максимова Е.Г. Результаты исследований зоогенных отложений пещеры Махневская Ледяная (Пермский край) // Пещеры: Сб. науч. тр. Пермь: ПГНИУ, 2011. Вып. 34. С. 71–99.

6. Dublyansky Y., Kadebskaya O., Luetscher M., Cheng H., Koltai, G., Spötl C. Tracking the southern boundary of the Late Pleistocene permafrost in Ural Mountains using cryogenic cave carbonates: feasibility study // XI International Conference on Permafrost: Book of Abstracts. Potsdam, Germany: Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. 2016. P. 47–48.

7. 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.

8. Александров В.В., Исламгулов М.А. Описание пещеры Грандиозная им. В.А. Ануфриева // Пещеры: Сб. науч. тр. Пермь: ПГНИУ, 2016. Вып. 39. С. 49–56.

9. Zak K., Urban J., Cilek V., Hercman H. Cryogenic cave calcite from several Central European caves: age, car-

bon and oxygen isotopes and a genetic model // Chemical Geology. 2004. No. 206 (1–2). P. 119–136.

10. Spötl C., Vennemann T.W. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2003. No. 17. P. 1004–1006.

11. Žak K., Onac B.P., Kadebskaya O.I., Filippi M., Dublyansky Y., Luetscher M. Cryogenic mineral formation in caves Ice Caves // Ice Caves. Elsevier Inc. All rights reserved. 2018. P. 123–162.

12. Zak K., Onac B.P., Persoiu A. Cryogenic carbonates in cave environments: A review // Quaternary International. 2008. No. 187 (1). P. 84–96.

13. Baker J.L., Lachniet M.S., Chervyatsova O., Asmerom Y., Polyak V.J. Holocene warming in western continental Eurasia driven by glacial retreat and greenhouse forcing // Nature Geoscience. 2017. No. 10. P. 430–435.

14. Dublyansky Y., Kadebskaya O., Luetscher M., Cheng H., Chaykovskiy I., Spötl C. 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: book of Abstracts. Ekaterinburg. 2014. P. 43–44.

15. Luetscher M., Cheng H., Dublyansky Y., Kadebskaya O., Spötl C. Investigating past permafrost in the Ural Mountains using cryogenic cave calcites // DEQUA-2014: book of Abstracts. Austria: Innsbruck. 2014. P. 79.

### References

1. Gavrilenko V.V. Ecological mineralogy and geochemistry in the structure of Earth sciences // Russian Mineralogical Society through the Eyes of Contemporaries: Sbornik statey po istorii geologicheskikh znaniy. Sankt-Peterburg: Rossiyskoye mineralogicheskoye obshchestvo, 2015. P. 72–84 (in Russian).

2. Kadebskaya O.I. Mineral and geochemical indicators of natural processes in subterranean karst landscapes of Urals: Avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk. Perm: PGNIU. 2017. 39 p. (in Russian).

3. 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. V. 169. No. 1–2. P. 17–33.

4. Andreychuk V., Galuskin E. Cryomineral formations of the Kungur ice cave // Peshchery, Perm. 2001. V. 27–28. P. 108–116. (in Russian).

5. Fadeyeva T.V., Kosintsev P.A., Kadebskaya O.I., Maksimova E.G. Results of studies of zoogenic deposits of the cave Makhnevskaya Ledyanaya (Perm region) // Peshchery. Perm. 2011. V. 34. P. 71–99 (in Russian).

6. Dublyansky Y., Kadebskaya O., Luetscher M., Cheng H., Koltai, G., Spötl C. Tracking the southern boundary of the Late Pleistocene permafrost in Ural Mountains using cryogenic cave carbonates: feasibility study // XI International Conference on Permafrost: Book of Abstracts.

Potsdam, Germany: Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. 2016. P. 47–48.

7. Chaykovskiy I.I., Kadebskaya O.I., Zak K. Morphology, composition, age and nature of carbonate spherulites from the caves of the Western Urals // *Geochemistry*. 2014. No. 4. P. 373–384 (in Russian).

8. Aleksandrov V.V., Islamgulov M.A. Description of the cave Grandiosnaya to them. V.A. Anufrieva // *Peshchery. Perm*. 2016. V. 39. P. 49–56 (in Russian).

9. Zak K., Urban J., Cilek V., Hercman H. Cryogenic cave calcite from several Central European caves: age, carbon and oxygen isotopes and a genetic model // *Chemical Geology*. 2004. No. 206 (1–2). P. 119–136.

10. Spötl C., Vennemann T.W. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2003. No. 17. P. 1004–1006.

11. Žak K., Onac B.P., Kadebskaya O.I., Filippi M., Dublyansky Y., Luetscher M. Cryogenic mineral formation

in caves Ice Caves // *Ice Caves*. Elsevier Inc. All rights reserved. 2018. P. 123–162.

12. Zak K., Onac B.P., Persoiu A. Cryogenic carbonates in cave environments: A review // *Quaternary International*. 2008. No. 187 (1). P. 84–96.

13. Baker J.L., Lachniet M.S., Chervyatsova O., Asmerom Y., Polyak V.J. Holocene warming in western continental Eurasia driven by glacial retreat and greenhouse forcing // *Nature Geoscience*. 2017. No. 10. P. 430–435.

14. Dublyansky Y., Kadebskaya O., Luetscher M., Cheng H., Chaykovskiy I., Spötl C. 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: book of Abstracts*. Ekaterinburg. 2014. P. 43–44.

15. Luetscher M., Cheng H., Dublyansky Y., Kadebskaya O., Spötl C. Investigating past permafrost in the Ural Mountains using cryogenic cave calcites // *DEQUA-2014: book of Abstracts*. Austria: Innsbruck. 2014. P. 79.

УДК 582.29:504.5:622.349.21 (470.13-924.82)

doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1

## Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таёжной зоне

© 2018. Т. К. Головки, д. б. н., профессор, гл. н. с.,  
 М. А. Шелякин, н. с., И. Г. Захожий, к. б. н., н. с.,  
 Г. Н. Табаленкова, д. б. н., в. н. с., Т. Н. Пыстина, с. н. с.,  
 Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
 e-mail: shelyakin@ib.komisc.ru

Представлены данные о функциональном состоянии трёх видов лишайников (*Hypogimnia physodes*, *Lobaria pulmonaria* и *Peltigera aphthosa*), обитающих на участках с разной степенью загрязнения в зоне влияния Средне-Тиманского бокситового рудника. Установлено, что загрязнение среды бокситовой пылью приводило к накоплению в талломах металлов, особенно алюминия и железа, значительная часть которых локализовалась на поверхности лишайников. Во внутриклеточной фракции обнаружено от 3–10% (Mn, Fe, Al, Cr, Pb) до 40% (Cu) всего их количества. На импактных участках отмечали снижение на 10–15% содержания в биомассе углерода – продукта ассимиляционной деятельности фотобионта. Лишайники с загрязнённых участков отличались высоким уровнем липопероксидации и повышенной активностью антиоксидантных ферментов, что указывает на развитие окислительного стресса. Заключение, что применение физиологических подходов в лишайноиндикации является эффективным способом мониторинга загрязнения среды и позволяет выявить первые признаки нарушений задолго до снижения жизнеспособности и таксономического разнообразия лишайников.

**Ключевые слова:** лишайники, лишайноиндикация, бокситовая пыль, металлы, компартиментализация элементов, окислительный стресс, перекисное окисление липидов, супероксиддисмутаза, пероксидаза.