

УДК 551.435.587

DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-33-43

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТОВОГО ЛЬДА, МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ВОЗДУХА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОЙ КАРСТОВОЙ ПЕЩЕРЫ ХЭЭТЭЙ В ЗАБАЙКАЛЬЕ

RESEARCH OF PLASTIC ICE, MINERAL FORMATIONS AND AIR OF MULTI-FROZEN KARST CAVE HEETEY IN TRANSBAIKALIA



И. И. Железняк,

Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН, г. Чита
lgc255@mail.ru

I. Zheleznyak,

Institute of natural resources, ecology and
cryology of SB RAS, Chita



С. В. Цыренжапов,

Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН, г. Чита
lgc255@mail.ru

S. Tsyrenzhapov,

Institute of natural resources, ecology and
cryology of SB RAS, Chita



А. А. Гурулев,

Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН, г. Чита
lgc255@mail.ru

A. Gurulev,

Institute of natural resources, ecology and
cryology of SB RAS, Chita

В качестве объекта исследования выбраны пещеры Хээтэй («холодная» и «теплая»), расположенные в южной части криолитозоны на территории Забайкальского края. Предметом исследования являются физико-химические параметры данного объекта. Более подробно приведены результаты исследований в «холодной» пещере Хээтэй. Выявлен химический состав пещерного воздуха с использованием хроматографа, проведено радиолокационное исследование грота пещеры в сантиметровом диапазоне, измерено собственное радиотепловое излучение с использованием СВЧ-радиометров.

Приведены сведения о природных условиях, определяющих зависимость состояния природных сред в карстовых пещерах Хээтэй. Дана характеристика условий залегания и состава природных сред карстовой пещеры (геологической, криогенной, атмосферной, подземных вод) с учетом криогенеза их формирования, трансформации и влияния на состав пещерного воздуха. Описан впервые обнаруженный в пещере редкий низкотемпературный минерал – арагонит, который с течением времени преобразуется в кальцит. Выявлена слоистая структура ледяного покрова на дне пещеры, что обусловлено сезонным попаданием поверхностных вод внутрь пещеры. Исследован состав приземного воздуха над поверхностью горных пород и в пещерах, а именно содержание в нем кислорода, азота, углекислоты, взрывоопасных газов – метана и водорода, паров ртути. Установлен неизвестный ранее факт повышенного геохимического фона концентрации радона, указаны наиболее вероятные причины образования. Радиометрические измерения в микроволновом диапазоне показали, что наблюдается потепление внутри пещеры за последнее десятилетие. Этот факт связывается с общим потеплением климата в Забайкалье, а также с увеличением количества посещений пещер неорганизованными туристами. С использованием наносекундного радиолокатора на частоту 10 ГГц в своде пещеры обнаружены скрытые внутренние полости, которые в дальнейшем могут привести к ее разрушению. По отпечаткам на стенках пещеры (в нижней части) видно, что уровень ледяного щита в 2015 г. опустился на 10 см от максимального уровня (зафиксированного в 1990 г.), что соответствует потере объема льда 12...15 м³ в год

Ключевые слова: горные породы; подземные воды; атмосфера; ледяной покров; арагонит; радон; СВЧ-радиолокация; карстовые образования; пещеры Хээтэй; спелеотуризм

Heetey caves (“cold” and “warm”) which are located in the southern part of the permafrost in the Transbaikal Region have been chosen as the object of the research in the article. The subject is the physical and chemical parameters of the object. The results of the research in the “cold” Heetey cave are given in more detail. The following methods of this object research were chosen: study of the chemical composition of cave air using a chromatograph; radar survey of the cave grotto in the centimeter range; measurement of its own radio-thermal radiation using microwave radiometers. As a result of the research, the following results were obtained.

The article provides information on the natural conditions that determine the dependence of the state of natural environments in the Heetey karst caves. The characteristics of occurrence and composition conditions of the natural environments of a karst cave (geological, cryogenic, atmospheric, groundwater) are given, taking into account the cryogenesis of their formation, transformation and influence on the cave air composition. A description of a rare low-temperature mineral, aragonite, which was first discovered in the cave and which is transformed into calcite over time is described. It is shown that the ice cover at the bottom of the cave has a layered structure, which is due to the seasonal ingress of surface water into the cave. The results of measurements of the surface air composition above the rocks’ surface and in caves, namely the content of oxygen, nitrogen, carbon dioxide, explosive gases – methane and hydrogen, mercury vapors are presented. A previously unknown fact of an increased geochemical background of radon concentration has been established. The most probable reasons for the formation and increased background of radon concentration are indicated. Microwave radiometric measurements have shown that there has been warming inside the cave over the past decade. This fact is associated with a general warming of the climate in Transbaikalia, as well as with an increase in the number of visits to caves by unorganized tourists. With the use of a 10 GHz nanosecond radar, hidden internal cavities were discovered in the roof of the cave, which can further lead to its destruction. The prints on the walls of the cave (in its lower part) show that the level of the ice sheet in 2015 is lower than its maximum level (1990) by 10 cm, which corresponds to a loss of ice volume of 12... 15 m³ per year

Key words: rocks; groundwater; atmosphere; ice cover; aragonite; radon; microwave radar; karst formations; Heetey caves; speleotourism

Введение. В ряде научных статей [1; 4; 13] исследуются пещеры, что обусловлено активным развитием туристической отрасли, археологии, изучением состава и миграции подземных вод, изучением вопросов современного практического использования пещер. Соответственно, геоэкологический мониторинг пещер в целях обеспечения экологической безопасности с использованием различных средств контроля является актуальным, а также имеет большую практическую значимость. Названными вопросами занимается специальный раздел науки – спелеология.

Исследовалась одна из двух пещер Хээтэй – «холодная» пещера, находящаяся в многолетнемерзлом состоянии, которая расположена на территории юга Забайкальской спелеологической провинции в области криолитозоны Восточной Сибири, а именно в отрогах хребта Адун-Челон в правом борту долины р. Онон. Окружающая местность типична для денудационного низкогорья Юго-Восточного Забайкалья – равнинный бессточный ландшафт сухих степей.

Следует отметить, что природные условия двух смежных и связанных друг с другом пещер существенно отличаются тем, что в

одной из них («теплой») среднегодовая температура выше 0 °С, а в другой («холодной») она составляет –2,3 °С...–2,5 °С, что обеспечивает наличие в ней льда [5].

Особый интерес вызывает проблема радоновой опасности при эксплуатационных мероприятиях в естественных и промышленных горных выработках, которая является актуальной в течение многих лет [9; 17; 18]. В том числе это относится и к Забайкальскому региону, отличающемуся развитием литокомплексов с высоким содержанием радиоэлементов и повышенным эманированием зон дезинтеграции горных пород, с которыми связаны многочисленные проявления радоновых вод, в частности известные курорты «Молоковка», «Ямкун», «Ургучан» и др. [14]. Кроме того пещеры Хээтэй являются природным памятником России.

При исследовании пещеры Хээтэй ставились задачи по исследованию состава атмосферы, в том числе и геохимического фона концентрации радона; поиска особых минералов внутри пещеры; изучению физико-химических параметров ледяного покрова внутри пещеры; исследованию с использованием радиолокатора на частоте 10 ГГц свода пещеры с целью поиска аномалий. Данный

круг задач связан с геоэкологическим мониторингом состояния пещеры различными средствами измерений.

Методика и методы исследования. В 1990–2016 гг. учеными Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН выполнены комплексные натурные экспериментально-теоретические исследования объектов и состояния природных сред, составляющих пещеры и их микроклимата с целью мониторинга и прогнозирования экологического состояния объекта.

Минералогические особенности «холодной» пещеры в одной из тупиковых гротов длиной около 20 м, шириной 2...6 м с отметками дна 778,7...780,5 м на наклонных и вертикальных поверхностях стен осуществлялись на примере кальцитовых образований в виде сталактитов, натеков и кварцевых друз различных размеров, мощности и стадий эволюции.

Визуально фиксировались внутренние изменения, происходящие в пещере Хээтэй, в том числе и изменение состояния криогенной среды (ледяной покров, ледяные сталагматы).

Радиометрические измерения собственного теплового излучения свода пещеры осуществлялись с использованием инфракрасного радиометра, который позволяет определять температуру микронного слоя поверхности с точностью 0,01 °С, а также СВЧ-радиометра, который позволяет фиксировать мощность собственного теплового излучения на длине волны 2 см. СВЧ-радиометр позволяет фиксировать температуру поверхности исследуемой среды в несколь-

ко миллиметров с точностью до 0,1 °С, и чем меньше жидкой фазы в горной породе и на ее поверхности, тем в больших слоях формируется тепловое излучение. Так, для сухого грунта на частоте 10 ГГц толщина такого слоя составляет около 5 м.

Дистанционные методы исследования при подповерхностной георадиолокации на частотах в несколько сотен мегагерц активно применяются для выявления структуры почв и отложений [11]. Нами же выполнялись радарные измерения свода пещеры на частоте 10 ГГц, в несколько раз превышающей мегагерцевый диапазон, с использованием наносекундного радара, изготовленного в Институте сильноточной электроники СО РАН. Радиолокатор позволяет определять диэлектрические неоднородности внутри среды, и чем выше частотный диапазон излучения, тем точнее определение размеров данных неоднородностей. К таким неоднородностям можно отнести и внутренние пустоты, которые сформировались в исследуемой среде по различным причинам.

Исследование атмосферы внутри пещеры Хээтэй осуществлялось средствами измерений, которые приведены в таблице. Измерения направлены на определение физических характеристик: температуры, магнитной восприимчивости, мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, полного вектора магнитного поля в подземной полости; а также состава подземной атмосферы по основным компонентам (азот, кислород, углекислота) и микропримесям (водород, метан, ртуть, радон).

*Результаты измерений физических и химических характеристик в пещере Хээтэй /
Results of physical and chemical characteristics measurements in the Heetey Cave*

Параметр среды / Environment setting	Прибор / Device	Количество измерений / Number of measurements	Показатели / Indicators	
			среднее / average	размах / range
χ , СИ (горная порода) / χ , SI (rock)	Каппаметр КТ-6 / Каппаметр КТ-6	6	4	3...6
$A_{эфф.}$, Бк/кг (горная порода) / $A_{эфф.}$, Bq / kg (rock)	Бетта-гамма радиометр «Припять» / Beta-gamma radiometer «Pripyat»	6	150	94...284
N_2 , об.% (воздух) / N_2 , vol.% (air)	Хроматограф газохром 3101 / Chromatograph gazochrome 3101	7	78	78...78
O_2 , об.% (воздух) / O_2 , vol.% (air)	Хроматограф газохром 3101 / Chromatograph gazochrome 3101	7	21	21...21

Окончание таблицы

Параметр среды / Environment setting	Прибор / Device	Количество измерений / Number of measurements	Показатели / Indicators	
			среднее / average	размах / range
H ₂ , об.% (воздух) / H ₂ , vol.% (air)	Хроматограф газохром 3101 / Chromatograph gazochrome 3101	7	<5·10 ⁻⁴	<5·10 ⁻⁴
CH ₄ , об.% (воздух) / CH ₄ , vol.% (air)	Хроматограф газохром 3101 / Chromatograph gazochrome 3101	7	<1·10 ⁻³	<1·10 ⁻³
CO ₂ , об.% (воздух) / CO ₂ , vol.% (air)	Хроматограф газохром 3101 / Chromatograph gazochrome 3101	7	1,02·10 ⁻¹	1,05·10 ⁻¹ ...1·10 ⁻¹
Hg, нг/л (воздух) / Hg, ng/l (air)	Абсорбциометры РА-915, АГП-01 2м / Absorptiometers RA-915, AGP-01 2m	5	22	7...21
Rn-222, Бк/м ³ (воздух) / Rn-222, Bq/m ³ (air)	Радиометр Альфарад плюс / Radiometer Alfarad Plus	4	377	145...495
t, °C (лед) / t, °C (ice)	Полупроводниковый тер- мометр / Semiconductor thermometer	29	(-)0,35	(-)0,1... (-)0,5
МЭД γ-излучение, мкЗв/ч (восточная воронка) / DER γ-radiation, μSv/h (eastern funnel)	Дозиметр ДКГ-01 «Сталкер» / Dosimeter DKG-01 "Stalker"	18	0,06	0,03...0,17
МЭД γ-излучение, мк- Зв/ч (лед воронки) / DER γ-radiation, μSv/h (funnel ice)	Дозиметр ДКГ- 01 «Сталкер» / DKG dosimeter 01 "Stalker"	31	0,04	0,03...0,09
Полный вектор магнитного поля, нТл / Total magnetic field vector, nT	Магнитометр МП-203 / Magnetometer MP-203	13	59 100	5899,7...39 158

Параметры измерительной аппаратуры (пороговая чувствительность, погрешность) соответствовали реальной концентрации веществ и сравнивались с контрольными образцами, а именно, рабочими газовыми смесями, приготовленными в аккредитованной организации (ФГУП «ВНИИМ им. Менделеева»), контрольным генератором паров ртути (КГПР-1), стандартными образцами (СО) содержания урана, тория, калия-40; магнитной восприимчивости из комплекта КТ-6; свидетельства госповерки дозиметра. Концентрацию радона в воздухе определяли с использованием Радиометр Альфарад плюс. Реализованный комплекс оценки состояния атмосферы пещеры представляется оптимальным для режимных наблюдений.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследований позволяют охарактеризовать основные среды, слагаю-

щие пещеру Хээтэй, в определенных показателях и представлениях.

Геологическая среда представлена наиболее распространенной горной породой – известняками светло-серого или темно-серого цвета с хаотической трещиноватостью, почти полностью состоящими из кальцита. По данным раннего исследования в пещерах Хээтэй, известняки характеризуются высоким содержанием СаО (до 55 %) [5]. В соответствии с геоморфологической картой района изысканий пещера расположена на пересечении трассы основного тектонического разлома с оперяющим. Первый имеет четкое северо-восточное направление, второй разлом ориентирован строго на север. Пещера вытянута в северо-восточном направлении, т. е. по основному разлому, который внутри пещеры проявляется явно в виде крупной трещины на поверхности свода.

По данным исследования П. М. Большакова [2], в рассматриваемом районе наиболее четко выражены системы трещин северо-восточного и северо-западного направлений. Эти системы пересекаются между собой под углом $50...70^\circ$. Падение трещин обычно крутое – $60...80^\circ$, реже $10...50^\circ$. Исследования, проведенные внутри пещеры, подтверждают эти выводы. Также установлена система трещин северного простирания с углами падения в интервале $60...70^\circ$ [5]. Слои известняков имеют падение в районе пещеры под углом 35° , а трещиноватость сечет их как вкрест простирания, так и параллельно, образуя угол со слоистостью, в последнем случае в интервале $30...40^\circ$.

Вмещающий пещеру массив известняков состоит из значительного количества мелких, средних и крупных подземных колодеобразных карстовых каналов округлого или эллиптического сечения в несколько десятков сантиметров или более 1 м. Их длина колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров. Некоторые из них пусты в силу значительного снижения притока воды из вышележащих горизонтов.

Особое внимание обращает на себя лёдородное образование в виде вывала большого количества крупных обломков известняка объемом приблизительно 800 м^3 , который сложен смерзшимися глыбами породы и расположен в северо-восточной части пещеры. Его высота достигает 9 м от поверхности донного льда.

Перед входами в пещеры на склоне северо-восточной экспозиции расположены карстовые воронки глубиной приблизительно 20 м каждая, которые в 1829 г. были заполнены водой и представляли собой небольшие озера [12]. Наиболее вероятно, что эти воронки образовались в результате обрушения сводов более ранних карстовых пустот, предшествовавших формированию современных пещер Хээтэй. По этой причине нельзя исключать возникновение в будущем рисков обрушения сводов современных пещер в результате естественных процессов развития карста.

В геологической среде изучением обломков, взятых из вывала, установлена их значительная выветрелость, образовавшаяся в условиях относительного постоянства термо-влажностного режима в пещере. Это указывает, что вывал образовался сравнительно давно в результате сильного зем-

летрясения. Так, в 1725 г. по всей Сибири ощущалось землетрясение, называемое Великим Восточно-Сибирским. Вместе с тем, можно предположить, что вывал глыбовых обломков в пещере мог образоваться и в результате размыва блока по контакту с последующим обвалом.

Исходя из изложенного, нельзя исключать возможность возникновения в будущем образования подобных вывалов или обрушения свода пещеры в результате техногенных воздействий, например, буровзрывных работ при освоении Усть-Борзинского месторождения известняков, расположенного вблизи пещеры [5].

В результате минералогического исследования интерес вызывали кораллообразные кальцитовые минеральные образования в виде круговых кораллов и линейных форм размерами до 1 м (рис. 1).



Рис. 1. Кораллообразные кальцитовые минеральные образования в пещере Хээтэй / Fig. 1. Coraloid calcite mineral formations in the Heetey cave

Лабораторными исследованиями, выполненными минерологом Е. И. Ищук (ЛИЦИМС Читинского ФГУП), установлено, что эти минералы представлены полупрозрачными и прозрачными радиально-лучистыми агрегатами желто-белого цвета с проявлением блеска от стеклянного до жирного в изломе. В катодных лучах минерал светится бледно-оранжевым цветом. Спайность отсутствует. На гранях призмы наблюдаются тонкие характерные желобки. При воздействии соляной кислотой минерал бурно вскипает, как кальцит. При обычной температуре в присутствии растворителя медленно самопроизвольно переходит в кальцит. По этим свойствам ис-

следуемый минерал представляет собой арагонит [7] и относится к классу неустойчивых кристаллов редкого типа. В пещерах он встречается редко. На территории России арагонит впервые обнаружен в Верхнеберезовской карстовой пещере в 1962 г. [16]. Его образование в пещерах принято связывать с природой низкотемпературных минералов, формирующихся только вблизи земной поверхности. Арагонит существует не более 10 млн лет. С помощью определения изотопного состава этого минерала удается восстановить палеоклимат в регионах, где он обнаруживается, с точностью датирования 1,5 года [19].

Подземные воды. Гидрогеологическая среда определяется широко развитой сетью трещин и карстовых пустот, способствующей интенсивной циркуляции подземных вод, образующих сравнительно мощный подземный поток, направленный в сторону бессточной котловины озер Ике-Цаган-Нор и Богча-Цаган-Нор.

Трещинно-карстовые воды залегают на глубинах 10...36,5 м, в отдельных случаях – до 70 м. Пьезометрические напоры вод комплекса характеризуются величинами от 1,3...2,0 до 35...37 м. Верхним водоупором для них служат современные суглинистые и глинистые отложения мощностью до 15 м. Предположительная глубина залегания нижней границы водоупора составляет 120...150 м. Производительность скважин колеблется в пределах 0,13...0,22 м³/ч.

Питание трещинно-карстовых вод происходит главным образом за счет инфильтрации осадков и подтока трещинно-пластовых вод прилегающего песчано-сланцевого нижнесреднедевонского водоносного комплекса. В водораздельных частях хребтов Кэтуй-Нуру и Адун-Челон воды являются безнапорными, а в долинах приобретают напор, величина которого достигает 30 м. Разгрузка трещинно-карстовых вод осуществляется родниками (Баян-Булак, Шэбэртуй, Ара-Булак и др.) и в долинах падей и распадков. Их режим относительно постоянен. Воды пресные с минерализацией 0,3...1,0 г/л, по составу гидрокарбонатно-кальциево-магниевого. В этой связи научный интерес представляют результаты исследований особенностей химического состава вод карстовых пещер Прибайкалья и юга Сибирской платформы, а также геохимии подземных вод Онон-Борзинского региона [10].

Известняки подстилаются сланцами, поверхность контакта с которыми субгоризонтальна. Повсеместно отмечается сеть разнонаправленных трещин и пустот карстовой природы, вмещающих подземные воды нисходящего типа и куржак сублимационного льда, образовавшийся над входом в пещеру и на стенах большого грота в результате циркуляционного тепло-массообмена между атмосферным и пещерным воздухом [5].

Криогенная среда представлена преимущественно покровным льдом в форме наледного покрова (распластанного горизонтального массива, покрывающего пол обледеневшего грота); в форме крутопадающего ледяного языка в привходовой части пещеры; в форме внутреннего ледяного бугра, подпирающего свод пещеры, сталактитов, сталагмитов и сталагнатов (рис. 2) различных размеров [5].



Рис. 2. Сталагнат в пещере Хээтэй /
Fig. 2. Stalagnatus in the Heetey cave

Объекты криогенной среды сформировались в результате многолетних природных процессов при среднегодовой температуре атмосферной и геологической сред пещеры –2,3...–2,5 °С [5]. Покровный ледяной массив по площади дна Большого грота пещеры имеет различную мощность: вблизи стен свода она составляет приблизительно 10...120 см, а в центре грота – 3,5...4,0 м. Мощность ледяного покрова определена в 1993 г. методом сейсмометрии и подтверждена методом колонкового бурения с помощью установки поискового бурения УПБ-25. В 2015 г. мощность покровного льда в центре Большого грота определена с помощью устройства для послойного измерения физических свойств ледяного массива в условиях его естественного залегания [8]. В результате обнаруже-

на слоистая структура, обусловленная наличием слоев, которые состоят из мелких пылевых частиц. Объем покровного льда по ориентировочным подсчетам составляет 13 300...15 300 м³.

Донный покровный ледяной массив Большого грота имеет слоистое строение, свидетельствующее о многолетнем характере его происхождения в результате медленного послойного замерзания. Слоистость представляет собой чередование прослоек льда и наносов. Наносы, как правило, сложены элементами поверхностных почв и обогащены органикой (растительный детрит, помет летучих мышей, грызунов и т. п.).

В ледяном массиве преобладают плоские кристаллы со средними размерами в шлифе 0,5...2,0 см; средняя площадь кристаллов 1,4...1,6 см²; средняя длина границ кристаллов в шлифе 5,0...5,2 см. Коэффициент удлинения a/b (где a – длина кристаллов в шлифе, b – ширина) составляет 4,0...6,0.

На глубине 2,3...2,8 м наблюдаются полые цилиндрические отверстия – «трубки» – объемом 0,07...1,0 см³. Лед прозрачный в связи с отсутствием мелких газовых включений и примесей. Структура льда в горизонтах равномерно-зернистая. Преобладают кристаллы с ориентировкой оптических осей перпендикулярно к поверхности замерзания. Крупные размеры кристаллов свидетельствуют о достаточно высокой температуре замерзания воды, порядка $-1,0...-1,5$ °C (не ниже -2 °C). В диапазоне глубин 2,5...3,0 м. В структуре донного льда в отдельных местах отмечаются фильтрующие песчаные прослойки или трещины (пустоты) в нижележащем слое льда.

В криогенной среде в результате многолетних натурных наблюдений установлено, что по состоянию на май 2015 г. поверхность покровного льда дна Большого грота опустилась в среднем на 10 см по сравнению с положением, отмечавшимся в мае 1990 г., что видно на фотографии (рис. 3). Это позволяет расчетным методом определить уменьшение объема покровного льда на дне Большого грота, которое составило около 380 м³ за 25 лет, т. е. 12...15 м³/год.

В результате радиолокационного исследования свода пещеры обнаружены пустоты, которые не фиксировались визуальным методом. Один из результатов измерения отраженного сигнала показан на рис. 4.

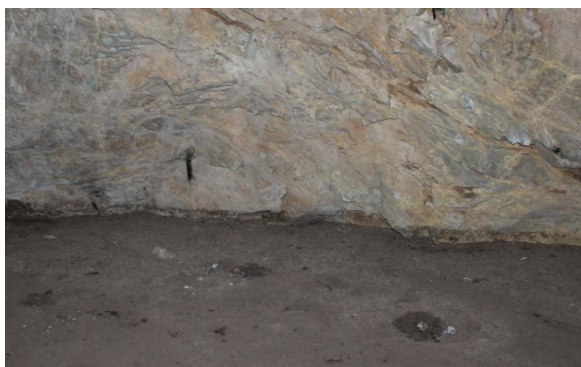


Рис. 3. Понижение уровня ледяного покрова в пещере Хээтэй. Темная широкая полоса (10 см) у основания стенки пещеры / Fig. 3. Lowering the level of the ice cover in the Heetey cave. The dark broad line (10 cm) at the bottom of the cave wall

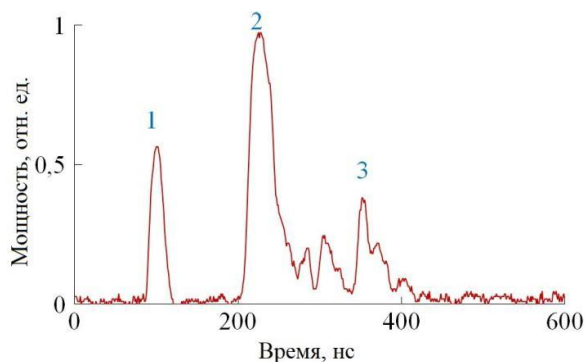


Рис. 4. Результаты радарных измерений свода пещеры на длине волны 3 см в пещере Хээтэй при угле зондирования 45 °C: 1 – опорный сигнал; 2 – отраженный сигнал от поверхности; 3 – отраженный сигнал от внутренней полости / Fig. 4. Results of radar measurements of the cave roof at a wavelength of 3 cm in the Heetey cave at a sounding angle of 45°: 1 – reference signal; 2 – reflected signal from the surface; 3 – reflected signal from the internal cavity

В работе «Изучение карстовых ледяных пещер дистанционными методами» [3] приведены результаты измерений теплового излучения свода пещеры в инфракрасном и сантиметровом диапазонах. Обнаружено повышение на 0,15 К температуры поверхности свода пещеры в верхней точке, а в районе входа в пещеру – понижение на 0,1 К. Данное обстоятельство обусловлено близким расположением к поверхности верхней точки свода пещеры, понижение же температуры у входа в пещеру вызвано обдувом воздухом. Описанный эффект наблюдается и в микроволновом

диапазоне, излучение которого, в отличие от инфракрасного диапазона, формируется на больших глубинах. При повторном измерении определено повышение приблизительно на 0,1 К средней температуры свода пещеры. Таким образом, внутри данного объекта наблюдается потепление.

Атмосферная среда. Исследования состава и свойств атмосферной среды в пещерах Хээтэй до настоящего времени не проводились. Очевидно, исследователи полагают, что состав подземной атмосферы в карстовой пещере аналогичен составу приземной атмосферы. Однако в 1985 г. С. В. Касимцевым и М. Н. Ждановым [6] высказывалось предположение, что в течение длительного предшествующего периода в пещере была повышена загазованность воздуха, затруднявшая дыхание человека. В этой связи исследователи не изучали ее детально.

Согласно данным о природных средах, составляющих карстовую пещеру Хээтэй, геологические, гидрогеологические и геокриологические условия объекта участвуют в формировании и трансформациях компонентов подземной атмосферы. Подтверждением этому служат результаты исследований, которые позволили установить в структуре нижних горизонтов массива донного льда наличие «отдушин» – вертикальных полых трубок, возникших под действием струй воздуха из подстилающих сред. Это явление обнаружено при изучении стенок и дна шурфов, выработанных в массиве донного льда и проявилось в выделении характерного запаха, свойственного застоявшемуся воздуху-замору, а также звука в форме шипения и свиста, когда воздух проходит через отверстия [5]. Кроме этого можно полагать, что в пополнении специфичными газами атмосферной среды в пещере участвуют процессы разложения наносов, сложенных элементами поверхностных почв и обогащенных органикой (растительным детритом, помет летучих мышей, грызунов и т. п.).

Исследования подземной атмосферы, по данным хроматографического анализа (см. таблицу), показали, что ее состав практически соответствует наземному: содержание кислорода в воздухе по объему – 21 % и азота – 78 %; концентрация углекислоты не превышает предела для горных выработок – «следы» 0,1 %; взрывоопасные газы – метан и водород – менее порога чувстви-

тельности прибора. Концентрация паров ртути – 7...21 нг/л – в пределах безопасной нормы (равной 300 нг/л для помещений постоянного пребывания). В то же время в атмосфере пещеры наблюдается геохимически повышенный фон концентрации радона – 145...495 Бк/м³. В действующих подземных горных выработках при постоянном пребывании персонала продолжительностью до 2000 ч/год предельно допустимая концентрация радона не должна превышать 310 Бк/м³ (НРБ-99). Мощность экспозиционной дозы жесткой радиации (гамма-излучения) от горных пород в пещере находится на низком безопасном уровне (3...9 мкР/ч), характерном для известняков, и соответствует удельной активности образцов (6 точек отбора) 94...284 Бк/кг – I класс материалов, самый безопасный – до 370 Бк/кг.

Указанная концентрация радона не может явиться следствием эманирования данных низкорadioактивных горных пород. Вероятный источник эманиции, с повышенным (относительно известняков) содержанием урана и равновесного радия, может находиться под толщей известняков, характер переноса – конвекционный с восходящим потоком воздуха по системе крутопадающих трещин.

Опасность природных радиоактивных аномалий для здоровья человека в настоящее время оценивается по содержанию радона и трития [15]. Последний является инициатором ядерной реакции легких элементов с быстрыми нейтронами, продуцируемыми радионуклидами уранового и ториевого рядов по α , n – реакции. Совместное нахождение аномальных содержаний радона и трития установлено в карстовых полостях районов Москвы, Сочи и прогнозируется для Кавказа, Урала и Кольского полуострова. Также г. В. Фомин выявляет тенденцию ежегодного увеличения концентрации радона в карстовой пещере «Воронцовская» в районе г. Сочи [15]. Логично предположить и симметричный рост концентрации трития.

Режимные измерения содержания радона и трития в пещере Хээтэй представляются необходимыми как с научной, так и с практической позиции (прежде всего, рекреационно-туристической).

Известняк обладает низкой магнитной восприимчивостью (χ) – $3...5 \times 10^{-5}$ ед. СИ – в полном соответствии с минералогическим

составом (см. таблицу), уровень естественного магнитного поля – полного вектора B – на поверхности над пещерой также находится в пределах 59 085...59 103 нТл. Знакопеременные локальные аномалии в «восточной» воронке и на дне ледяной пещеры логичнее всего связать с антропогенными обстоятельствами – стальной ограждающей решеткой и брошенными монетами российской чеканки. Следовательно, магнитометрические наблюдения могут быть одним из показателей техногенного прессинга.

Для начальной стадии возможного мониторинга и прогнозирования экологического состояния объекта выполненные наблюдения могут считаться вполне приемлемыми.

Заключение. Состав атмосферы в пещере практически соответствует составу атмосферы на поверхности. В то же время в атмосфере пещеры наблюдается повышенный геохимический фон концентрации радона – 145...495 Бк/м³. Вероятный источник эманации с повышенным относительно известняков содержанием урана и равновесного радия может находиться под толщей известняков. Его перенос в массиве горных

пород обеспечивается восходящим потоком воздуха по системе крутопадающих трещин.

На наклонной поверхности кальцитового сталактита натечной формы обнаружен минерал арагонит, относящийся к классу неустойчивых низкотемпературных кристаллов редкого типа. Своим образованием он обязан климатическим условиям внутри пещеры, а именно высокой влажности и низкой температуре.

Измерены свойства покровного льда дна пещеры. Обнаружена слоистость ледяного покрова.

С использованием радиофизических методов обнаружено потепление внутри пещеры, а также наличие недоступных для визуального наблюдения пустот в массиве слагающих свод пород.

С целью контроля и прогноза динамики состояния массива горных пород и криогенных образований в пещере, их взаимосвязи и влияния на вариации потока радона необходимо продолжить исследования природных сред в карстовой пещере Хээтэй с целью геоэкологического мониторинга и обеспечения экологической безопасности.

Список литературы

1. Абдуллин Ш. Р. Влияние температуры на распределение цианобактерий и водорослей в пещерах // Спелеология и спелестология. 2015. № 6. С. 266–268.
2. Большаков П. М. Карст Усть-Борзинского месторождения Восточного Забайкалья // Региональное карстоведение. М.: АН СССР, 1961. С. 232–238.
3. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Обязов В. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Изучение карстовых ледяных пещер дистанционными методами // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 133–137.
4. Голованова Л. В., Дороничев В. Б., Дороничева Е. В., Кулькова М. А., Сапелко Т. В., Спасовский Ю. Н. Новые данные о неолите Северо-Западного Кавказа из Мезмайской пещеры // Российская археология. 2016. № 3. С. 5–19.
5. Железняк И. И., Мальчикова И. Ю. Пещеры Хээтэй. Чита: Экспресс-издательство, 2005. 102 с.
6. Касимцев С. В., Жданов М. Н. Пещеры-ледники Юго-Восточного Забайкалья // Записки Забайкальского филиала Географического общества СССР. 1985. Т. 118. С. 55–57.
7. Костов И. Минералогия. М.: Мир, 1971. 584 с.
8. Лукьянов П. Ю., Железняк И. И., Гурулев А. А. Устройство для послыоного измерения физических свойств ледяного массива в условиях его естественного залегания // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. С. 90–93.
9. Сердюкова А. С., Капитанов Ю. Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.
10. Складорова О. А., Складоров Е. В., Меньшагин Ю. В., Данилова М. А. Динамика формирования и рудогенерирующий потенциал минерализованных озер Забайкалья и Северо-Восточной Монголии // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 1. С. 35–41.
11. Сысуев В. В. Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах на примере Смоленско-Московской возвышенности // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2014. № 4. С. 26–33.
12. Таскин А. Геогностическое описание долины Онон-Борзинской. СПб., 1829. 91 с.
13. Трофимова Е. В. Применение индекса нарушенности пещер для оценки состояния подземной среды // Известия Русского географического общества. 2015. Т. 147, № 3. С. 41–48.

14. Флешлер В. И. Радон // Энциклопедия Забайкалья. Новосибирск: Наука, 2006. С. 501–502.
15. Фомин Г. В. Тритий и радон в районах цепочек карстовых пещер // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2006. № 2. С. 69–73.
16. Шестов И. Н. Верхнеберезовская карстовая пещера с арагонитом // Пещеры. Пермь: Перм. ун-т, 1962. Вып. 2. С. 35–39.
17. Alberigi S., Pecequilo B. R., Lobo H. A., Campos M. P. Assessment of effective doses from radon levels for tour guides at several galleries of Santana Cave, Southern Brazil, with CR-39 detectors: preliminary results // Radiation Protection Dosimetry. 2011. Vol. 145, No. 2-3. P. 252–255.
18. Holaday D. A., Rushing D. E., Coleman R. D., Woolrich P. F., Kusnetz H. L., Bale W. F. Control of radon and daughters in uranium mines and calculations on biologic effects. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1957. 98 p.
19. Martín-García R., Alonso-Zarza A. M., Martín-Pérez A., Schröder-Ritzrau A., Ludwig T. Relationships between colour and diagenesis in the aragonite-calcite speleothems in Basajaun Etxea cave, Spain // Sedimentary geology. 2014. Vol. 312. P. 63–75.

References

1. Abdullin Sh. R. *Speleologiya i spelestologiya* (Speleology and spelestology), 2015, no. 6, pp. 266–268.
2. Bolshakov P. M. *Regionalnoye karstovedeniye* (Regional karst studies). Moscow: AN SSSR, 1961, pp. 232–238.
3. Bordonsky G. S., Gurulev A. A., Obyazov V. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. *Geografiya i prirodnyye resursy* (Geography and natural resources), 2012, no. 1, pp. 133–137.
4. Golovanova L. V., Doronichev V. B., Doronicheva E. V., Kulkova M. A., Sapelko T. V., Spassovsky Yu. N. *Rossiyskaya arkheologiya* (Russian archeology), 2016, no. 3, pp. 5–19.
5. Zheleznyak I. I., Malchikova I. Yu. *Peshchery Kheetey* (Heetei Caves). Chita: Express Publishing House, 2005. 102 p.
6. Kasimtsev S. V., Zhdanov M. N. *Zapiski Zabaykalskogo filiala Geograficheskogo obshchestva SSSR* (Notes of the Transbaikalian branch of the USSR Geographical Society), 1985, vol. 118, pp. 55–57.
7. Kostov I. *Mineralogiya* (Mineralogy). Moscow: Mir, 1971. 584 p.
8. Lukyanov P. Yu., Zheleznyak I. I., Gurulev A. A. *Pribory i tekhnika eksperimenta* (Equipment and technology of experiment), 2017, no. 6, pp. 90–93.
9. Serdyukova A. S., Kapitanov Yu. T. *Izotopy radona i korotkozhevushchiye produkty ikh raspada v prirode* (Isotopes of radon and short-lived products of their decay in nature). Moscow: Atomizdat, 1969. 312 p.
10. Sklyarova O. A., Sklyarov E. V., Menshagin Yu. V., Danilova M. A. *Khimiya v ustoychivom razvitii* (Chemistry in sustainable development), 2012, no. 1, pp. 35–41.
11. Sysuev V. V. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* (Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography), 2014, no. 4, pp. 26–33.
12. Taskin A. *Geognosticheskoye opisaniye doliny Onon-Borzinskoy* (Geognostic description of the Onon-Borzinskaya valley). St. Petersburg, 1829. 91 p.
13. Trofimova E. V. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* (News of the Russian Geographical Society), 2015, vol. 147, no. 3, pp. 41–48.
14. Fleshler V. I. *Entsiklopediya Zabaykaliya* (Encyclopedia of Transbaikalia). Novosibirsk: Nauka, 2006, pp. 501–502.
15. Fomin G. V. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya "Termoyadernyy sintez"* (Problems of atomic science and technology. Thermonuclear Fusion Series), 2006, no. 2, pp. 69–73.
16. Shestov I. N. *Peshchery* (Caves). Perm: Perm. un-ty, 1962, is. 2, pp. 35–39.
17. Alberigi S., Pecequilo B. R., Lobo H. A., Campos M. P. *Radiation Protection Dosimetry* (Radiation Protection Dosimetry), 2011, vol. 145, no. 2-3, pp. 252–255.
18. Holaday D. A., Rushing D. E., Coleman R. D., Woolrich P. F., Kusnetz H. L., Bale W. F. *Control of radon and daughters in uranium mines and calculations on biologic effects* (Control of radon and daughters in uranium mines and calculations on biologic effects). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1957. 98 p.
19. Martín-García R., Alonso-Zarza A. M., Martín-Pérez A., Schröder-Ritzrau A., Ludwig T. *Sedimentary geology* (Sedimentary geology), 2014, vol. 312, pp. 63–75.

Авторы выражают благодарность заслуженному геологу Читинской области В. И. Флешлеру за помощь в организации измерений параметров воздуха

Коротко об авторах

Железняк Илья Иосифович, д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Область научных интересов: исследование физико-технических комплексов, состоящих из локальных массивов промерзающих и оттаивающих рыхлых горных пород и взаимодействующих с ними сооружений, возводимых и эксплуатируемых в условиях юга криолитозоны Восточной Сибири, в том числе Забайкалья
lgc255@mail.ru

Цыренжапов Сергей Васильевич, мл. науч. сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Область научных интересов: инженерная геология, физические свойства мерзлых дисперсных сред
lgc255@mail.ru

Гурулев Александр Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Область научных интересов: радиоп физика, дистанционное зондирование мерзлых сред в микроволновом диапазоне
lgc255@mail.ru

Briefly about the authors

Ilya Zheleznyak, doctor of technical sciences, junior scientific employee, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: study of physical and technical complexes consisting of local massifs of freezing and thawing loose rocks and structures interacting with them, constructed and operated in the south of the permafrost zone of Eastern Siberia, including Transbaikalia

Sergey Tsyrenzhapov, junior researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: engineering geology, physical properties of frozen dispersed media

Aleksander Gurulev, candidate of physico-mathematical sciences, assistant professor, junior scientific employee, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: radio physics, remote sensing of frozen media in the microwave range

Образец цитирования

Железняк И. И., Цыренжапов С. В., Гурулев А. А. Исследование пластового льда, минеральных образований и воздуха многолетнемерзлой карстовой пещеры Хээтэй в Забайкалье // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 7. С. 33–43. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-33-43.

Zheleznyak I., Tsyrenzhapov S., Gurulev A. Research of plastic ice, mineral formations and air of multi-frozen karst cave Heetey in Transbaikalia // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 7, pp. 33–43. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-33-43.

Статья поступила в редакцию: 10.06.2020 г.
Статья принята к публикации: 27.07.2020 г.