

---

# ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.583.7

DOI:10.7242/echo.2021.3.1

## ПЕРИОДЫ ОТТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ В РАЙОНЕ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

О.И. Кадебская

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Основной целью работы являлось установление временных периодов оттаивания многолетнемерзлых пород в пределах Соликамской впадины в плейстоцене. Датировки криогенных карбонатов (маркеров начала оттаивания) проводились из пещер Дивья, Большая Махневская и Кизеловская (Виашерская), расположенных в непосредственной близости от северной и восточной границ Соликамской впадины. Было получено 29 уран-ториевых датировок, которые позволили установить начало потеплений в плейстоцене в районе Соликамской впадины (окончание Бёлинг-Алерёдского интерстадиала 13,2 тыс. лет назад, интерстадиалы 7 (ок. 34 тыс. лет), 21 (83-84 тыс. лет), 23 (ок. 104 тыс. лет) и 24 (106-107 тыс. лет), и межледниковий MIS 5e (128 тыс. лет), MIS7 (243 тыс. лет назад), MIS9 (ок. 303 тыс. лет) и MIS13 (ок. 482 тыс. лет).

**Ключевые слова:** палеоклиматология, изотопный состав, пещерные отложения, Северный и Средний Урал.

### Введение

Мерзлота является важнейшим фактором изменения климата. Она связывает органический углерод, который при деградации мерзлоты в процессе потепления климата выводится в атмосферу в виде парниковых газов метана, CO<sub>2</sub> и воды.

U/Th датирование, сопряженное с изучением соотношений тяжелых и легких изотопов O и C, позволяет проводить последовательность палеоклиматических событий на протяжении последних 500 тыс. лет. Синхронность климатических событий в четвертичной истории Северного Урала с другими частями Евразийского континента на сегодняшний день не установлена вследствие малого количества имеющихся данных. Расположение границ многолетнемерзлых пород в течение плейстоцена неоднократно менялось, что привносило большой вклад в денудацию коры выветривания и сопровождалось просадками грунта при термоэрозии и солифлюкции.

Во время потеплений происходило активное поступление воды в карстовые полости, находящиеся в мерзлотном горизонте. Криогенные кристаллы в большом количестве образовывались в подземных наледях, а оставшийся кальцит сохранялся в подземном пространстве на протяжении многих тысяч лет. Данный тип пещерных отложений в современной палеоклиматологии является одним из самых надежных маркеров наступления теплых периодов в континентальных условиях [1].

Первые работы, посвященные криогенному пещерному кальциту, сформированному во время межледниковий, были выполнены в Центральной Европе (руководитель Карел Жак, Чехия).

Было установлено, что изотопный состав C и O криогенных карбонатов отличается от современных натечных образований и криогенных микровыделений (муки) на поверхности льда, что свидетельствует о другом механизме их формирования [2]. Крупные криогенные карбонаты формируются в условиях медленного замерзания

льда, что обусловило фиксацию в кристаллической структуре льда тяжелого изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$ .

Первые экспериментальные измерения, подтверждающие этот эффект, были осуществлены в 1968 г. [3], еще ранее эффект был теоретически обоснован Вестоном [4]. Было установлено, что более легкие молекулы  $^{16}\text{O}$  обладают большей кинетической энергией, чем тяжелые, и более подвижны. Таким образом, 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 [1].

Для криогенного кальцита также было установлено, что при переходе от центра к периферии кристалла происходит некоторое обогащение тяжелым углеродом ( $^{13}\text{C}$ ) и существенное обогащение легким кислородом ( $^{16}\text{O}$ ), отражающее их существенное фракционирование в среде минералообразования [5].

В морфологическом отношении территория представляет собой всхолмленную равнину, сильно изрезанную сетью рек, ручьев и оврагов. Абсолютные отметки рельефа колеблются в пределах от 106 м (урез Камского водохранилища) до +272 м (безымянная вершина на юго-востоке впадины). Промышленность в пределах Соликамской впадины связана с Верхнекамским месторождением калийных солей.

Территорию слагают отложения верхнего отдела пермской системы, перекрытые чехлом кайнозойских образований средней мощности 5-15 м. По скважинам П.И. Преображенский разделил надсолевые отложения Соликамской впадины на три толщи (снизу): толщу гипсоносных глин и гипсов, глинисто-мергелистую и плитняковую. Толщу медистых песчаников и отложения Соликамской свиты геологи относят к уфимскому ярусу верхней перми. Выше залегают отложения светло-серых глин, которые, согласно палинологическим исследованиям, относят к элювиально-делювиальному и делювиальному комплексам среднего и верхнего плейстоцена.

В пределах впадины естественных крупных карстовых полостей, доступных для исследования, не выявлено. Из изученных пещер Пермского края, в которых был найден криогенный кальцит, ближе всего к Соликамской впадине расположены пещеры Дивья, Большая Махневская и Кизеловская (Виашерская, рис. 1).

В пределах Предуральяского прогиба Соликамская впадина с севера граничит с Колвинской седловиной, в пределах которой и образовалась Дивья пещера, а с востока с зоной Западно-Уральской складчатости, где расположены Большая Махневская и Кизеловская (Виашерская) пещеры.

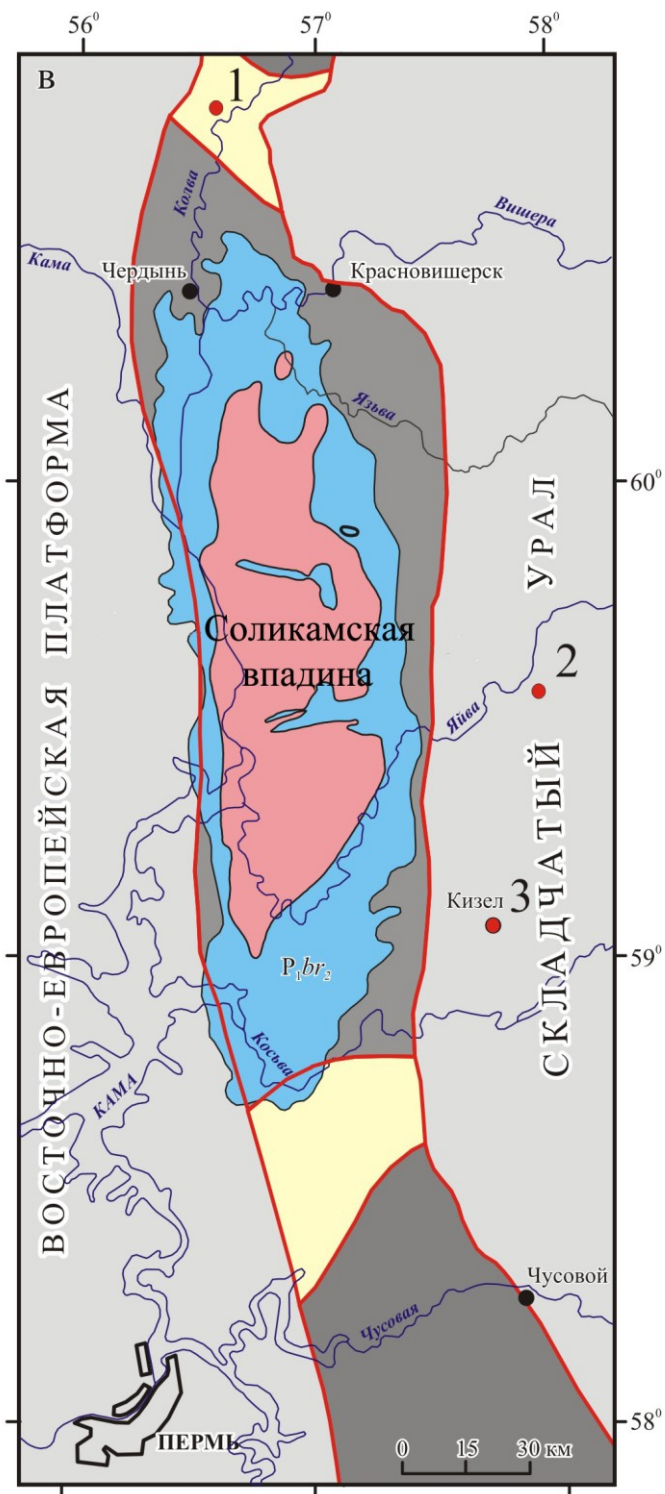
Протяженность Дивьей пещеры 10,1 км (является самой длинной пещерой Пермского края), глубина 28 м. Длина полости Большой Махневской пещеры по данным съемки пермского клуба спелеологов в 2019 г. составила 780 м, глубина 28 м. Кизеловская (Виашерская) пещера имеет длину 7,6 км, глубина 46 м.

### Методы исследования

В лабораторных условиях были проведены структурно-морфологические и изотопно-химические исследования. Для изучения морфологии кристаллов и минерального состава пород использовался поляризационный микроскоп фирмы «Карл Цейс». Изотопные анализы выполнялись в Innsbruck Quaternary Group при Инсбрукском университете (руководитель – академик Австрийской академии наук, профессор К. Шпётль).

Анализы углерода и кислорода образцов кальцита проводились на масс-спектрометре Delta PLUS XL (Fisher Scientific), оснащенном автоматической линией

для анализа карбонатов на основе интерфейса GASBENCH (Fisher Scientific) по методике изложенной в Spötl & Vennemann [6].  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  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 Cheng et al. [7] и скорректированы по детритовому Th. Абсолютные даты указаны в тыс. лет назад (от 1950 г.).



**Рис. 1.** Расположение изученных пещер от границ Соликамской впадины:  
1 – Дивья, 2 – Большая Махневская, 3 – Кизеловская (Вишерская)

### Результаты исследований

Находка криогенного кальцита в пещере Дивья была сделана Е.П. Дорофеевым в 1968 г. и вошла в историю как первая находка подобных отложений на территории России [8]. Позднее криогенный пещерный кальцит нами был обнаружен в гротах Ажурный, Дальний, Трущоба, Планетарий, Медвежий, Кабан, Черные Глаза, Индийский, Виноградный, Ястребова, Тортов, Солнца, Заблудших-2 и в галереях БИС и Интимной в течение экспедиций с 2005 по 2020 гг. Для датирования были отобраны 20 образцов.

Во время экспедиции 2019 г. подобные конкреции были найдены в Большой Махневской пещере в гроте Западный и галерее Большой Каньон. Для датирования были отобраны 3 образца.

В Кизеловской (Виашерской) пещере криогенный кальцит нашел Е.П. Дорофеев в 1980-е гг., а в 2000 г. губахинский спелеолог С.А. Меньших. В результате нескольких экспедиций в течение 2014-2015 гг., проведенных совместно с пермским клубом спелеологов, криогенный кальцит был обнаружен в 6 гротах: Радуга, Хозяин, Восточный Перекресток, Опасный Камень, Кристальный и Жемчужный. Для датирования были отобраны 6 образцов.

Образования кальцита представлены коричневыми и бежевыми агрегатами сфероцитов, реже отдельными сферолитами. Криогенные кристаллы из всех морфологических разновидностей представлены низкомагнезиальным кальцитом. В качестве примесей в нем присутствует Р, Sr, Ba и S.

Их изотопный состав варьируется  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-9,6\text{‰}$  и до  $-29,11\text{‰}$ . Зафиксированные значения  $\delta^{13}\text{C}$  в отобранных образцах составляют от  $-3,73\text{‰}$  до  $-11,0\text{‰}$ .

Для всех кристаллов кальцита из пещер Дивья и Большая Махневская фиксируется обогащение тяжелым углеродом ( $^{13}\text{C}$ ) и существенное обогащение легким кислородом ( $^{16}\text{O}$ ) от центра кристалла к его периферии (рис. 2) [9].

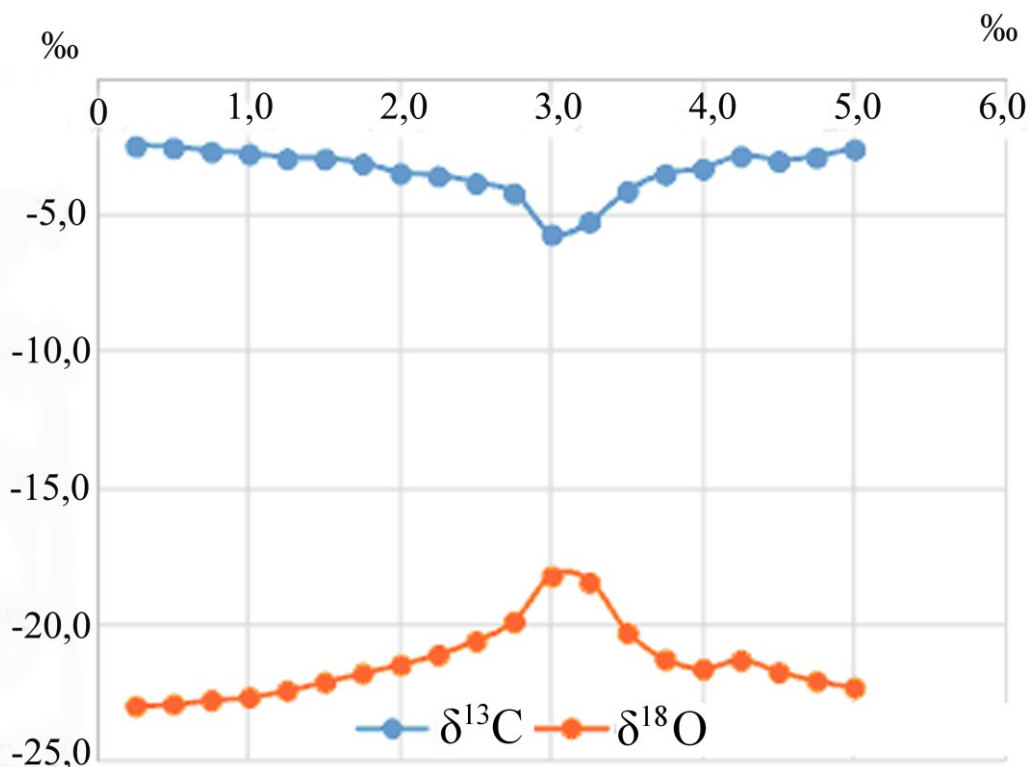


Рис. 2. Изменение изотопного состава от центра к периферии кристалла из грота Трущоба

Характерная морфология, зональность в распределении изотопов, их соотношение показывают, что изученные карбонаты из пещер Дивья, Большая Махневская и Кизеловская (Виашерская) относятся к криогенным [9].

Эпизоды оттаивания вдоль северной границы Соликамской впадины установлены по 20 датировкам криогенного кальцита из пещеры Дивья (табл. 1). Они связаны как с относительно краткосрочными потеплениями плейстоцена (окончание Бёлинг-Алерёдского интерстадиала 13,2 тыс. лет назад, интерстадиалы 7 (ок. 34 тыс. лет), 21 (83-84 тыс. лет), 23 (ок. 104 тыс. лет) и 24 (106-107 тыс. лет)), так и с длительными потеплениями – межледниковьями (микулинское межледниковье = MIS5e (128 тыс. лет), MIS9 (ок. 303 тыс. лет) и MIS13 (ок. 482 тыс. лет)).

Таблица 1

Результаты  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  датирования криогенных карбонатных образований из пещеры Дивья, Большая Махневская и Кизеловская (Виашерская)

№	Образец	$^{238}\text{U}$ ppb	$^{232}\text{Th}$ ppm	Возраст с кор- рекцией, лет	Относи- тельная ошибка, %
пещера Дивья					
1	NU_6	1410±2	9060±182	<b>482 644±8649</b>	1,79
2	DIV 40a	1487±2	58404±1226	<b>303 224±3407</b>	1,12
3	DIV40b	104±0	367±8	<b>128 024±1225</b>	0,96
4	грот Ажурный (DIV 38)	1839±2	72023±1722	<b>107 574±405</b>	0,38
5	NU_7b	916±1	3590±72	<b>107 345±285</b>	0,27
6	DIV41a	683±1	3960±80	<b>107 214±504</b>	0,47
7	NU_7a	1674±2	24077±486	<b>106 035±285</b>	0,27
8	Грот Ажурный (NU08a)	1290±2	4084±82	<b>106 915±390</b>	0,36
9	DIV41b	1188±1	6486±131	<b>106 122±417</b>	0,39
10	Грот Ажурный (DIV 01)	-	-	<b>104 800 ± 1500</b>	-
11	Грот Ажурный (NU08c)	584±1	2145±43	<b>104 383±277</b>	0,27
12	Грот Ажурный (NU08b)	2217±4	7186±145	<b>103 877±404</b>	0,39
13	DIV43a	1352±2	68867±1432	<b>85 679±326</b>	0,38
14	DIV43b	1515±3	247249±6218	<b>84 280±359</b>	0,43
15	NU_3c	3204±7	22024±443	<b>84 198±296</b>	0,35
16	NU_3b	2920±6	572751±14794	<b>84 098±275</b>	0,33
17	NU_5	3283±9	19365±392	<b>83 919±392</b>	0,47
18	NU_2	1989±4	1614±33	<b>82 989±308</b>	0,37
19	DIV43c	2111±4	8175±227	<b>34 305±733</b>	2,14
20	NU_3a	1671±2	100108±2703	<b>13 220±25</b>	0,19
Большая Махневская пещера					
1	грот Западный (U2)	2371,1±4,6	-	<b>243 483±1924</b>	0,79
2	грот Западный (U2a)	2095±2,8	-	<b>241 986±1481</b>	0,61
3	Большой Каньон (U1a)	3167,9±3,9	-	<b>11 825±62</b>	0,52
Кизеловская (Виашерская) пещера					
1	CU_5	4616± 5	100113± 2093	<b>434 676± 7276</b>	1,67
2	KIZ 05	1465,9± 2,1	14756± 298	<b>197 983± 1106</b>	0,56
3	KIZ 08	754± 1,1± 2,1	849± 17	<b>107 948±572</b>	0,53
4	KIZ06	2407,2± 4,0	2327± 47	<b>13 161±46</b>	0,35
5	KIZ 07	3386,9± 6,7	65296± 1969	<b>12 839±37</b>	0,29
6	VIA 01	3142,641± 8,5	103610± 2580	<b>12757±49</b>	0,03

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  датирование криогенного кальцита из пещеры Большая Махневская позволило установить, что оттаивание многолетнемерзлых пород у восточной границы Соликамской впадины произошло 11,8 тыс. лет назад (начало голоцена) и 243,5 тыс. лет назад (начало межгляциала MIS7). Криогенный кальцит в Кизеловской (Виашерской) пещере образовывался 13 тыс. лет назад (начало голоцена), 198 тыс. лет назад (MIS7), 108 тыс. лет назад (интерстадиал 24) и 434,6 тыс. лет назад (MIS13).

В отличие от криогенного кальцита, формирование натечных кор происходит в условиях теплого и влажного климата. Датирование сталагмитов из грота Ажурный, Планетарий и Дальний в п. Дивья показало [9], что последняя, наиболее активная стадия роста сталагмитов была относительно короткой и пришлась на время микулинского межледниковья, около 130 тыс. лет назад. После микулинского межледниковья граница распространения мерзлоты несколько раз перемещалась на юг, поэтому многие спелеотемы в пещерах Северного и Среднего Урала поломаны при образовании льда в пещерах.

### Выводы

На основании изучения изотопного состава O и C кальцита, отобранного в пещерах Дивья, Большая Махневская и Кизеловская (Виашерская), было установлено, что этот кальцит является криогенным и является маркером начала теплых периодов – межледниковий.

Th-U датирование криогенного кальцита из пещер Северного Урала позволило определить время периода оттаивания многолетней мерзлоты в пределах Соликамской впадины. Датирование натечных образований позволило определить наиболее теплые и влажные периоды в плейстоцене в пределах Северного Урала, благоприятные для интенсификации гипергенных процессов в надсолевой толще.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадебская О.И. Минеральные и геохимические индикаторы природных процессов в подземных карстовых ландшафтах Урала: дис. ... д.г.н.; 25.00.23 / Кадебская Ольга Ивановна. – Пермь, 2016. – 295 с.
2. Zak K., Onac B.P., Persoiu A. Cryogenic carbonates in cave environments: A review // *Quaternary International*. – 2008. – V. 187. – P. 84-96. – DOI: 10.1016/j.quaint.2007.02.022.
3. O'Neil J.R., Barnes I.  $\text{C}^{13}$  and  $\text{O}^{18}$  compositions in some fresh-water carbonates associated with ultramafic rocks and serpentinites: western United States // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1971. – V. 35, № 7. – P. 687-697.
4. Weston Jr.R.E. Hydrogen isotope fractionation between ice and water // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1955. – V. 8., № 5-6. – P. 281-284.
5. Žak K., Onac B.P., Kadebskaya O.I., Filippi M., Dublyansky Y., Luetscher M. Cryogenic mineral formation in caves // *Ice Caves*. / ed. A. Persoiu, S.-E. Lauritzen. – Amsterdam: Elsevier, 2018 – Part 6. – P. 123-162. DOI: 10.1016/B978-0-12-811739-2.00035-8.
6. Spotl, C., Vennemann, T.W. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. – 2003. – V. 17, № 9. – P. 1004-1006. – DOI: 10.1002/rcm.1010.
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. – V 169, № 1-2. – P. 17-33. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00157-6.

8. 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. – DOI: 10.7868/S0016752514020046.
9. 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 / eds: Gunther F. and Morgenstern A. – Potsdam, Germany, 2016. – DOI:10.2312/GFZ.LIS.2016.001 Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein.

УДК 551.4

DOI:10.7242/echo.2021.3.2

## **ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ НЕДР С ЦЕЛЮ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЭКСКУРСИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕЧКИНСКОЙ ПЕЩЕРЫ**

А.В. Красиков, С.Ф. Кудымов  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Мечкинская пещера является уникальным объектом с точки зрения экскурсионного использования. Для обеспечения безопасного использования пещеры в экскурсионных целях в 2020–2021 г. была проведена съемка поверхности и подземная съемка пещеры с последующим составлением совмещенного плана для создания проекта горного отвода. Результатом подземной съемки стало уточнение протяженности основных ходов, морфометрических показателей всех гротов и галерей. Данные поверхностной съемки позволили определить точное положение пещеры относительно поверхности, привязать основной и второй вход пещеры, уточнить мощность перекрывающих сульфатных пород.

**Ключевые слова:** Мечкинская пещера, топографическая съемка, план пещеры, проект экскурсионного использования пещеры.

### **Введение**

Большая Мечкинская пещера – пещера на левом берегу реки Мечки, расположенная в 20 км к северу от города Кунгура и в 2 км от ближайших населенных пунктов Заспалово и Родионово. Пещера заложена в сульфатных толщах кунгурского яруса нижней перми. Основной вход в пещеру расположен в срединной части правого крутопадающего склона Каменного Лога и представляет собой крутонаклонный колодец, выходящий в грот Первый. Второй вход в пещеру представляет собой узкий лаз, из которого по наклонно-вертикальным проходам можно попасть в грот Миниатюрный. Пещера состоит из пяти крупных гротов и соединяющих их галерей общей протяженностью 350 м. Самый крупный грот – Большой длиной 50 м, шириной 30 м и высотой до 7 м [1].

Для обеспечения безопасного использования пещеры в экскурсионных целях требовалась разработка совмещенного плана Мечкинской пещеры и земной поверхности над пещерой. В дальнейшем по этим данным будет выполнен проект горного отвода.

### **Практическая часть**

Было произведено два вида съемок: поверхностная и подземная с последующим их совмещением.

Наземная съемка проводилась летом 2021 г. в пределах ранее выделенного полигона, расположенного над Мечкинской пещерой. Основной целью являлось построение топографического плана территории исследований и получение отметок рельефа, кар-