

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 551.44

**Многолетний эксперимент по изучению растворимости сульфатных пород в Кунгурской Ледяной пещере****А.С. Казанцева**

ПФИЦ УрО РАН, Кунгурская лаборатория-стационар

E-mail: kazantseva666@mail.ru

*(Статья поступила в редакцию 26 сентября 2017 г.)*

Продолжен эксперимент по изучению скорости растворения образцов в Кунгурской Ледяной пещере, начатый Е. П. Дорофеевым в 1985 г. Проведен ряд продолжительных наблюдений по выщелачиванию 10 образцов гипса и ангидрита. Относительная скорость карстовой денудации вычислена двумя способами: измерение общей потери вещества (мм/год) и определение изменения массы образцов (мг/сут или %). Подтверждено и выявлено, что по сравнению с чистыми сульфатными породами образцы с примесями обладают наибольшей скоростью растворения. Активизация растворения происходит в весеннее время или во время интенсивных осадков в летне-осенний период, сопровождающийся подтоплением участков пещеры. Начат новый цикл наблюдений по выщелачиванию сульфатных пород в органических трубах.

Ключевые слова: *Кунгурская Ледяная пещера, карстовая денудация, эксперимент, сульфатные породы.*

DOI: 10.17072/psu.geol.17.2.105

**Введение**

Кунгурская Ледяная пещера является единственной в мире пещерой, где в условиях карбонатно-сульфатного карста в течение более 50 лет проводятся режимные наблюдения за состоянием геологической среды. Скорость развития карстовых процессов в переслаивающихся карбонатно-сульфатных отложениях на порядок выше, чем в карбонатных. На сегодняшний день одной из главных методик для подсчета интенсивности карстовой денудации является определение изменения весовых параметров изучаемых образцов путем экспериментального изучения, которое позволяет смоделировать природные процессы в естественных условиях.

Изучение растворимости сульфатных пород необходимо для выяснения законо-

мерностей развития карста. Кунгурская Ледяная пещера – одна из форм проявления карстовых процессов, в условиях которой происходит растворение и вынос растворенного вещества. Изучение скорости растворения позволит оценить динамику изменения массива пещеры и в дальнейшем подсчитать относительный объем карстовой денудации.

Английский ученый С.Т. Традгилл (Tradgill, 1977) предложил оценивать скорость карстовой денудации по изменению веса пластинок растворимых пород, лежащих на массиве, помещенных на определенное время в интересующие исследователя горизонты карстующегося массива или на контакт с другими породами, почвой и т. д. Высокая точность измерений позволяет определить изменение веса пластинок за короткий период времени и

дает возможность прогноза и сравнения скорости карстовой денудации на различных участках (Андрейчук, Дорофеев, Лукин, 1990).

### История и методика эксперимента

На базе Кунгурской Ледяной пещеры в 1957-1985 гг. проводили эксперименты по изучению растворимости карстующихся пород в лабораторных и естественных условиях (Болотов, Максимович, Бельтюкова, 1980; Горбунова, Дорофеев, Максимович, 1986; Горбунова, Дорофеев, Минькевич, 1989). В течение ряда лет (с 1983 г.) сотрудники кафедры динамической геологии и гидрогеологии совместно с Кунгурской лабораторией-стационаром проводили в пещере экспериментальные наблюдения скорости растворения гипсоангидритовых пород. Для этого были изготовлены таблетки размером  $5 \times 5 \times 1,5$  см и подвешены на леске в южном озере грота Длинный. С 1985 г. Е. П. Дорофеев изучал растворение пород на наклонных, горизонтальных и вертикальных площадках с помощью специально вмонтированных реперов в стены гротов Дружбы Народов и Длинный, а также в блоки гипсоангидрита, которые были заложены в озера этих же гротов.

В 2013-2014 гг. сотрудники Кунгурского стационара возобновили наблюдения за растворимостью пород. В озерах гротов Дружбы Народов и Длинный были обнаружены блоки гипсоангидрита. До настоящего времени сохранилось 10 блоков из 18 описанных в журнале Е. П. Дорофеева. Штыри, расположенные снизу исследуемых образцов, имитируют растворение сводов, сбоку – на наклонных площадках. Были измерены штыри, вмонтированные в стены гротов. Образцы взвешивались после высушивания при комнатной температуре в течение месяца. Замеры производились штангенциркулем с микрометрическим глубиномером в пространстве между штырями. Весной 2014 г. блоки были помещены обратно в озеро.

В 2016 г. провели следующую серию замеров. Помимо вышеописанных измерений, в органических трубах гротов Морское Дно, Эфирный, Дружбы Народов были обнаружены штыри, замеры по ним зафиксированы.

### Исследование растворения гипсоангидритовых блоков

Растворение монолитных образцов гипсоангидрита происходило в сульфатно-кальциевой воде при ее медленном движении. Средняя многолетняя минерализация воды подземных озер в пещере  $2,220 \text{ г/дм}^3$ . В весенний период при смешивании речных и пещерных вод минерализация имеет пониженные значения, в осенний период происходит повышение минерализации в результате подтока трещино-карстовых вод. Растворение сульфатных пород носит сезонный характер и связан с величиной дефицита насыщения воды сульфатом кальция. Если показатель дефицита насыщения отрицательный, то происходит процесс растворения, если показатель больше нуля – процесс осаждения из раствора. В условиях Кунгурской пещеры процесс растворения протекает постоянно за счет поступления трещинно-карстовых вод, дефицит насыщения здесь близок или чуть больше нуля, т. е. воды близки к насыщению сульфатом кальция (Дублянский, 2005). Активизируется процесс растворения гипсоангидритов в весенне-осенний период интенсивных дождей.

Интенсивность растворения гипсоангидрита в условиях Кунгурской Ледяной пещеры определена двумя способами: вычислением общей потери вещества (мм/год) и изменения массы образцов. Первый способ – вычисление общего количества потери вещества за 1 год. Второй способ – вычисление скорости растворения сульфатных пород с учетом изменения массы гипсоангидритовых блоков. Этот способ применим для образцов, у которых известна первоначальная масса.

Для количественной оценки скорости растворения за 1985-2016 гг. с помощью штангенциркуля и микрометрического глубиномера были замерены расстояния между металлическими штырями. Общая потеря вещества для образцов 10,20,30,40 и 50 подсчитана за 2014-2016 гг. Для остальных блоков (119, 101, 125, 123, 138) потеря вещества учитывается за весь период наблюдений (1985-2016). Скорость растворения за 31 год для пяти блоков, расположенных в южной части грота Длинный, составляет 3,4-21 мм. Для образцов из грота Дружбы Народов и Длинного (сев. часть) скорость колеблется от 0,3 до 3,6 мм (табл. 1). При измерении и

вычислении потери вещества выявлена неравномерная растворимость сторон гипсоангидритовых блоков. Причина неравномерного растворения заключается в скорости потока воды и его воздействии на определенные стороны.

Среднегодовая величина денудации поверхности образцов за весь период наблюдений составляет 0,11-1,29 мм/год. Максимальная потеря зафиксирована у блока номер 30, находящегося на подтапливаемом участке в период паводка и интенсивных дождей. Средняя скорость растворения по всем блокам составляет 0,47 мм/год (табл. 2).

Таблица 1. Результаты измерений по блокам 1985 – 2016 гг.

Номер блока	Местоположение	Дата замеров массы, г			Потеря веса, %	Потеря вещества (за весь период наблюдений), мм
		1985	2013	2016		
119	Грот Длинный, южное озеро		7105	6965	2,0	21,0
101			9760	9585	1,8	11,5
125			3728	3600	3,4	10,5
123			2670	2545	4,7	3,4
138			5028	4210	16,3	19,6
10	Грот Дружбы Народов, гидрост		5945	5895	0,8	0,3
20			10095	10020	0,7	1,7
40			5445	5375	1,3	0,6
50			13120	12995	1,0	1,0
30	Грот Длинный, переток у северного озера		7990	7240	9,4	3,6

Весовые измерения образцов гипсоангидрита в 2016 г. показывают, что потеря веса от начального составляет 0,7-16,3 % почти за 3 года (табл. 1). Максимальная потеря веса наблюдается у образцов 138 и 30. Образец 30 находился во временном потоке воды, и растворение происходило только в весеннее время или во время интенсивных осадков в летне-осенний период, когда зона у северного озера была подтоплена. Наибольшая потеря веса за 2013-2016 гг. зафиксирована у образца 138 (16,3 %). По результатам химического анализа содержание  $CaSO_4 \times 2H_2O$  в этом образце составляет примерно 93%, остальное – примеси. В остальных

образцах содержание  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  равно 96%. Следовательно, относительная скорость растворения гипсоангидрита с наибольшим количеством примеси больше, чем у образцов сульфатных пород с наименьшим количеством примеси.

Скорость растворения – это количество вещества, перешедшего в раствор с единицы поверхности в единицу времени ( $mg/cm^2/сут$ ):

$$W = \frac{P_1 - P_2}{St} \tag{1}$$

Для исследуемых блоков гипсоангидрита, у которых отсутствует геометрическая форма, очень трудно вычислить

площадь поверхности растворения, поэтому предлагается ею пренебречь. Уравнение (1) приобретает вид

$$W = \frac{P_1 - P_2}{t} \quad (2)$$

Таким образом, скорость растворения равна количеству растворенного вещества в единицу времени (мг/сут) (табл. 2).

**Таблица 2.** Результаты вычисления денудации поверхности исследуемых блоков

Денудация поверхности образцов			
Номер блока	Измерения по штырям, мм/год		Измерение по массе, мг/сут
	1985-2016	2013-2016	2013-2016
119	0,68	-	0,14
101	0,37	-	0,17
125	0,34	-	0,13
123	0,11	-	0,12
138	0,63	-	0,81
10	-	0,10	0,05
20	-	0,59	0,07
40	-	0,21	0,07
50	-	0,34	0,12
30	-	1,24	0,74

Интенсивность растворения образцов составляет 0,05-0,81 мг/сут. Максимальная денудация характерна для образцов 30 и 138 – 0,74 и 0,82 мг/сут соответственно.

### Исследование растворения стен

Следующий ряд исследований основан на изучении процесса растворения стен карстовыми и инфильтрационными водами. В феврале и апреле 1985 г. Е. П. Дорофеевым в стены гротов Дружбы Народов и Длинный были заложены несколько пар реперов. Стены в гроте Длинный, где вмонтированы репера, сложены огипсованным неоднородным ангидритом с включением доломита. Стены в гроте

Дружбы Народов сложены ангидритом. Измерения проводились между парой реперов. Они показали, что общая потеря вещества для грота Длинный составляет 20,03 мм, для грота Дружбы Народов – 12,50 мм за 31 год (табл. 3).

Данные исследования говорят о том, что скорость растворения в гроте Длинный выше, чем в гроте Дружбы Народов. Для химического анализа были отобраны образцы пород со стен гротов. Результаты анализа показали, что содержание  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  в стенах грота Длинный составляет 94 %, в гроте Дружбы Народов – 96 %. Огипсованный ангидрит с включениями доломита растворяется лучше, чем без включений.

**Таблица 3.** Результаты измерений скорости растворения стен

Местоположение	Общая потеря вещества за 1985-2016 гг., мм	Измерения по штырям (1985-2016), мм/год
Северное озеро, грот Длинный	20,03	0,52
Гидропост, грот Дружбы Народов	12,50	0,40

### Исследование растворения гипсоангидритовых таблеток

Экспериментами по изучению относительной скорости растворения образцов гипсоангидритовых пород занимались ученые Пермского университета (Н.Г. Максимович, И.И. Минькевич, К.А. Горбунова) совместно с сотрудниками Кунгурской лаборатории (Е.П. Дорофеев). Для этого из гипса и ангидрита иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми были изготовлены плитки размером

5×5×1,5 см. Образцы были подвешены в южном озере грота Длинный. Замеры проводили с 1983 г.с интервалом в несколько месяцев до 1992 г. Далее наблюдения прекратились и возобновились в 2013 г. Два образца ангидрита с примесью доломита почти полностью растворились, поэтому исследования по ним остановились. За 32 года потеря массы ангидрита составила 75,24 %, гипса – 67,52 %. Растворение ангидритогипса (0,006 мг/сут) происходило интенсивнее, чем гипса (0,005 мг/сут) (табл. 4).

Таблица 4. Результаты вычисления денудации поверхности таблеток гипсоангидрита

№ образца	Состав, %	Весовые измерения, г				Потеря массы,		Скорость растворения, мг/сут
		01.06. 1983	30.09. 1985	11.10. 1992	02.03. 2016	г	%	
1	Ангидрит 90, гипс 10	100,96	91,16	65,30	25,00	75,96	75,24	0,006
2	Гипс 100	92,36	85,10	66,97	30,00	62,36	67,52	0,005
3	Ангидрит 82, доломит 18	110,23	101,66	62,99	-	-	-	-
4	Ангидрит 92, доломит 8	113,97	101,10	55,90	-	-	-	-

### Исследование растворения стен органических труб

Органические трубы представляют собой вертикальные округлые каналы, сформированные за счет поступающей инфильтрационной воды. Через органические трубы происходит нисходящее перемещение воды, стены труб покрыты многочисленными каррами (Дублянский, Кадебская, 2004). Вероятно, процесс растворения породы характерен и для этой зоны. В 2017 г. в гротах Морское Дно, Эфирный и Дружба Народов найдены несколько пар реперов, вмонтированных в стены органических труб. О ранее проводившихся измерениях информации не найдено, поэтому начат новый цикл наблюдений.

Органическая труба в гроте Эфирный находится у северной стены грота. Стены сложены гипсоангидритом, поступающая инфильтрационная вода имеет преимущественно сульфатно-кальциевый состав. Здесь найдена и измерена одна пара реперов.

У южной стены грота Дружба Народов располагается большая органическая труба, в стенах которой обнаружена одна пара реперов. Стены трубы покрыты желобчатыми каррами, возникшими при растворении гипса струйками воды. Со свода капает вода, имеющая сульфатно-магниевый-кальциевый состав.

В гроте Морское Дно в одной из четырех имеющихся труб найдены две пары штырей. Стены органических труб сложены гипсом с большим количеством каверн и

борозд. Капель имеет сульфатно-магниево-кальциевый состав (Болотов, Максимович, Бельтюкова, 1980; Казанцева, 2016).

### Заключение

В Кунгурской лаборатории ГИ УрО РАН ведутся многолетние метеорологические, гидрогеологические и гидрохимические наблюдения. Пещера является природной лабораторией, в условиях которой эффективно проводить эксперименты по изучению относительной скорости растворения в конкретной среде. Постоянные наблюдения сокращают период измерений, что позволяет выявить динамику процесса карстовой денудации. Величину карстовой денудации для Кунгурской Ледяной пещеры вычисляли двумя способами: по разнице весовых значений образцов (мг/сут) и общей потере вещества (мм/год). Скорость растворения с учетом весовых изменений была вычислена за 2013-2016 гг., т. к. информации о замерах массы образцов в 1985 г. не обнаружено. Интенсивность растворения образцов за этот период составляет 0,05-0,81 мг/сут или 0,10-1,24 мм/год. Скорость растворения стен равна 0,40-0,52 мм/год, таблеток – 0,005-0,006 мг/сут.

Исследования показали, что в условиях низких температур и высокой минерализации воды озер пещеры растворение происходит постоянно за счет поступления инфильтрационных и трещинно-карстовых вод. Средний многолетний индекс насыщения воды озер Кунгурской Ледяной пещеры равен -0,06, коэффици-

ент растворимости 0,96. Наиболее интенсивны процессы растворения в период весенних паводков и выпадения осадков в летне-осенний период.

### Библиографический список

- Андрейчук В. Н., Дорофеев Е. П., Лукин В. С. Органые трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещер // Пещеры. Проблемы изучения: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 1990. С. 16-23.
- Болотов Г. Б., Максимович Н. Г., Бельтюкова Н. В. О методах расчета скорости карстовой денудации // Достижения молодых ученых в области геологии, геофизики, географии: тез. докл. науч.-практ. конф. Пермь, 1980. С. 25-26.
- Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Максимович Н. Г., Минькевич И. И. Исследование процесса растворения гипсоангидритов в условиях Кунгурской пещеры // Пещеры. Методика изучения: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 1986. С. 39-47.
- Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Минькевич И. И. Натурные исследования растворимости гипса и ангидрита в Кунгурской пещере // Минералы и отложения пещер и их практическое значение: тез. докл. совещ. Пермь, 1989. С. 53-54.
- Дублянский В. Н. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / УрО РАН. Екатеринбург, 2005. 375 с.
- Дублянский В. Н., Кадебская О. И. По Кунгурской Ледяной пещере. Пермь: Изд-во «Звезда», 2004. 133 с.
- Казанцева А. С. Анализ химического состава воды и уровня загрязнения в гротах КЛП за период 2006-2015 гг. // Стратегия и процессы освоения георесурсов: матер. ежегодной науч. сессии / Горный ин-т УрО РАН. Пермь, 2016. № 14. С. 48-50.

## Long-Term Experiment on Studying of Disolution of the Sulphatic Rocks in the Kungur Ice Cave

**A.S. Kazantseva**

Perm Federal Research Center of Ural Branch of RAS, Kungur Laboratory, Russia. E-mail: kazantseva666@mail.ru

The experiment on studying of speed of samples dissolution in the Kungur Ice Cave begun by E.P. Dorofeev in 1985 has been going on. The long observations on leaching of 10 samples of gypsum and anhydrite is carried out. The relative rate of karst denudation is calculated in two ways: measuring the total loss of the substance (mm / year) and alteration of the samples mass (mg / day or %). It was confirmed that the higher dissolution rate has been observed for samples with impurities than that for pure sulfate rocks, and activation of dissolution occurs in spring or during intense precipitation in the summer-autumn period accompanied by flooding of the cave areas. A new cycle of observations on the leaching of sulfate rocks in organ pipes has begun.

**Key words:** *Kungur Ice Cave; karst denudation; experiment; sulfate rock.*

## References

- Andreichuk V.N., Dorofeev E.P., Lukin V.S.* 1990. Organnye trubyy v karbonatno-sulfatnoy krovle peshcher [Organ pipes in a carbonate and sulfate roof of caves]. *In Peshchery. Problemy izucheniya*, pp. 16-23. (in Russian)
- Bolotov G.B., Maksimovich N.G., Beltyukova N.V.* 1980. O metodakh rascheta skorosti karstovoy denudatsii [About methods of calculation of karst denudation speed]. *In Dostizheniya molodykh uchenykh v oblasti geologii geofiziki geografii*, pp. 25-26. (in Russian)
- Gorbunova K.A., Dorofeev E.P., Maksimovich N.G., Minkevich I.I.* 1986. Issledovanie protsessy rastvoreniya gipso-angidritov v usloviyakh Kungurskoy peshchery [Study of process of gypsum-anhydrites dissolution in conditions of the Kungur Cave]. *In Peshchery. Problemy izucheniya*, pp. 39-47. (in Russian)
- Gorbunova K.A., Dorofeev E.P., Minkevich I.I.* 1989. Naturnye issledovaniya rastvorimosti gipsa i angidrita v Kungurskoy peshchere [Natural study of solubility of gypsum and anhydrite in the Kungur Cave]. *In Mineraly i otlozheniya peshcher i ikh prakticheskoe znachenie*, pp. 53-54. (in Russian)
- Dublyanskiy V.N.* 2005. Kungurskaya Ledyanaya peshchera: opyt rezhimnykh nablyudeniyy [Kungur Ice Cave: experience of regime observations]. Ekaterinburg, p.375. (in Russian)
- Dublyanskiy V.N., Kadebskaya O.I.*, 2004. Po Kungurskoy Ledyanoy peshchere. [About the Kungur Ice Cave]. Perm, p.133. (in Russian)
- Kazantseva A.S.* 2016. Analiz khimicheskogo sostava vody i urovnya zagryazneniya v grotakh KLP za period 2006-2015 gg. [The analysis of the chemical composition of the water and level of pollution in KIC grottoes during 2006-2015] *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov*. 14:48-50. (in Russian)