

Для сравнения были проанализированы все данные по станции Пермь с 1980 г. по 1990 г. (46 месяцев наблюдений) и установлено, что изотопный состав осадков демонстрирует сильную и очень сильную корреляцию с температурой воздуха ( $r = 0,80$ ). Корреляция для станции Пермь немного слабее по сравнению со станцией Кунгур (17 месяцев наблюдений) и различие становится наиболее выраженным при корреляции между изотопным составом и количеством осадков. Для длинного ряда наблюдений станции Пермь корреляция очень слабая и статистически незначимая ( $r = 0,07$ ), тогда как для станции Кунгур значимость имеет пограничное значение ( $r = r_{crit}$ ). Такое различие может быть связано с аномальностью режима осадков в Пермском крае в 2017 г., когда их выпало около 140% от нормы.

**Выводы.** Полученные данные позволили впервые получить локальную линию метеорных вод для Кунгура. Средневзвешенные годовые значения изотопного состава осадков демонстрируют широтную зональность, снижаясь в направлении с юга на север. Короткий ряд наблюдений (19 месяцев) позволяет только предварительно оценить связь изотопного состава осадков с метеопараметрами (температурой и количеством осадков). Отмечается сильная корреляция между изотопным составом осадков и температурой воздуха. Около 80% вариации изотопного состава осадков в рамках годового хода определяется температурой воздуха. Количество осадков показывает умеренную корреляцию с изотопным составом осадков для короткой серии наблюдений на станции Кунгур. При этом корреляция отсутствует для длинной серии наблюдений на станции Пермь. Различие объясняется аномальным режимом осадков в Пермском крае в 2017 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-45-590369 «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края» (2017 г.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702-1703.
2. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – V. 16. – P. 436-468.
3. Evans J.D. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences. – Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing, 1996. – 600 p.

УДК 552.08

DOI: 10.7242/echo.2019.1.3

## ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРНЫХ ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ МАССИВ ЛЕДЯНОЙ ГОРЫ

А.В. КРАСИКОВ

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

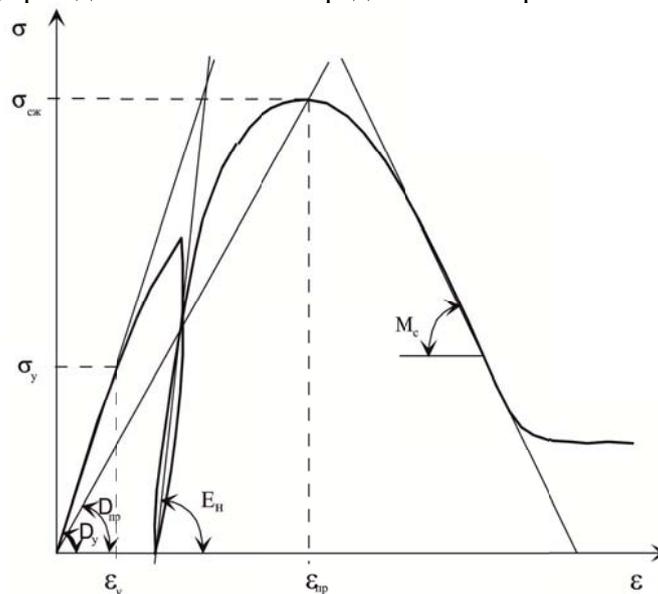
**Аннотация:** Исследование механических характеристик горных пород является актуальной задачей при прогнозе развития негативных процессов и обеспечения безопасности проведения горных работ на закарстованных территориях, какой и является массив Ледяной горы. Сложность данного прогноза может заключаться в том, что неоднородные по составу сульфатные и карбонатные породы будут менять механические свойства как по площади распространения, так и по мощности пластов. Кроме этого следует учитывать и воздействие на породы различных геологических процессов. В данной статье изложены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик горных пород методом прямого опробования. Он заключается в испытании образцов, изготовленных из керна скважины и монолитов, отобранных из гротов Кунгурской ледяной пещеры. Для сульфатно-карбонатных пород массива впервые были определены основные механико-физические показатели, такие как предел прочности, модули деформации и упругости, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения и др. Анализ полученных результатов позволил

нам предположить, что разные значения пределов прочности в пещерных и скважинных образцах связаны с неоднородностью состава и строения пород, различной степенью трещиноватости и раздробленности пород, величиной влияния давления, приложенного со стороны вмещающих горных пород. Также стоит отметить воздействие процессов физического выветривания, таких как влажность, температурные вариации и воздействие воды. В дальнейшем для общего анализа разреза требуется выделить интервалы локального дробления, трещиноватости, гидратации, складчатости, что даст возможность построить механическую основу для геодинамической модели Ледяной горы.

**Ключевые слова:** Кунгурская Ледяная пещера; прочностные и деформационные характеристики; сульфатные и-карбонатные породы; закарстованный массив; сжатие.

**Введение.** Массив Ледяная гора представляет собой платообразную закарстованную возвышенность между реками Сылвой и Шаквой, образованную толщей переслаивающихся карбонатно-сульфатных пород кунгурского яруса, представленного филипповским и иренским горизонтами. Последний, в свою очередь, состоит из трех сульфатных и двух карбонатных пачек. Для исследования механических свойств пород, слагающих массив, был выполнен отбор образцов. Всего было отобрано 25 монолитов, 17 – из керна скважины № 4443 (абс. отметка 199,75 м), 8 – отобранных из стенок и сводов гrotов самой пещеры. По результатам отбора были выполнены испытания, в ходе которых рассчитали комплекс прочностных и деформационных показателей, включающих в себя предел прочности на одноосное сжатие, коэффициент сцепления и угол внутреннего трения и др.

**Методика и результаты работ.** Для выполнения испытаний на одноосное сжатие было изготовлено 2-5 проб каждого образца цилиндрической и призматической формы размером 35×35×70 мм. Испытания образцов на сжатие проводились на жестком электромеханическом прессе Zwick – Z 250 с предельной нагрузкой 25 тонн. Схема определения механических характеристик пород при одноосном сжатии представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема определения прочностных и деформационных характеристик горных пород по полной диаграмме деформирования при одноосном сжатии:  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие, МПа;  $\sigma_{уп}$  – предел упругости, МПа;  $D$  – модуль деформации (касательный) на пределе упругости, ГПа  $D_{пр}$  – модуль деформации (секущий) на пределе прочности, ГПа;  $\varepsilon_y$  – относительная продольная деформация, соответствующая пределу упругости, %;  $\varepsilon_{пр}$  – относительная продольная деформация, соответствующая пределу прочности (разрушающая деформация), %;  $E$  – модуль упругости, определенный по разгрузочной ветви диаграммы деформирования, ГПа  $M$  – модуль спада, определенный по запредельной ветви диаграммы деформирования, ГПа.

Расчет предела прочности при одноосном сжатии заключался в измерении максимальной разрушающей нагрузки при нагружении образца и рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{np} = \frac{P_{np}}{S} \cdot 10, \text{ МПа}; \quad \sigma_{сжс} = \sigma_{np} \cdot K, \text{ МПа} \quad (1)$$

где  $P_{np}$  – разрушающая нагрузка, кН;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;  $K$  – поправочный коэффициент, учитывающий форму образца (ГОСТ 21153.2-84, 2001).

Относительная продольная деформация рассчитывалась по величине абсолютной деформации образца, соответствующей перемещению плит пресса (ГОСТ 28985-91, 2004):

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $\Delta h$  – абсолютная продольная деформация, мм;  $h$  – высота образца, мм.

Модуль деформации (секущий) определялся по отношению напряжений на пределе прочности к соответствующим им деформациям (ГОСТ 28985-91, 2004):

$$D_{np} = \frac{\sigma_{np}}{\varepsilon_{np}}, \text{ ГПа}, \quad (3)$$

Модуль деформации (касательный) определялся по линейной части нагрузочной ветви диаграммы нагружения образца (ГОСТ 28985-91, 2004):

$$D_y = \frac{\sigma_j - \sigma_i}{\varepsilon_j - \varepsilon_i}, \text{ ГПа}, \quad (4)$$

где  $\sigma_i, \sigma_j$  – напряжения, соответствующие начальной и конечной точкам линейного участка кривой деформирования;  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  – относительные продольные деформации, соответствующие напряжениям  $\sigma_i, \sigma_j$ .

Модуль упругости (разгрузочный) определялся по линейной части разгрузочной ветви диаграммы деформирования (ГОСТ 28985-91, 2004):

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_k}{\varepsilon_n - \varepsilon_k}, \text{ ГПа}, \quad (5)$$

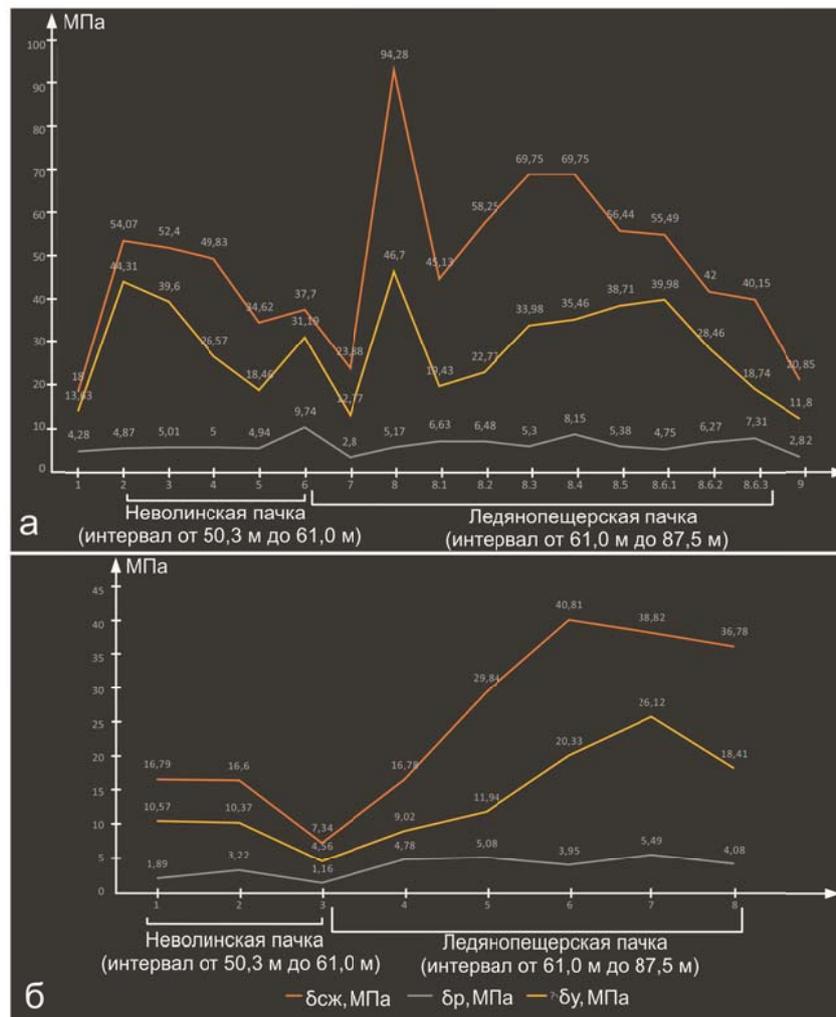
где  $\sigma_k, \sigma_n$  – напряжения, соответствующие начальной и конечной точкам линейного участка разгрузочной ветви кривой деформирования;  $\varepsilon_k, \varepsilon_n$  – относительные продольные деформации, соответствующие напряжениям  $\sigma_k, \sigma_n$ .

Определение предела прочности горных пород при одноосном растяжении выполнялось методом раскалывания плоскопараллельных пластин соосными клиньями в соответствии с ГОСТ (ГОСТ 21153.3-85, 1986):

$$\sigma_p = K \frac{P_p}{S} 10, \text{ МПа}, \quad (6)$$

где  $P_p$  – разрушающая нагрузка, кН;  $S$  – площадь разрушения, см<sup>2</sup>;  $K$  – поправочный коэффициент.

По результатам испытаний на растяжение и одноосное сжатие был построен паспорт прочности слагающих пород. При описании предельной огибающей кругов Мора были определены коэффициент сцепления ( $C$ ) и тангенс угла внутреннего трения ( $tg f$ ) [1]. Все полученные физико-механические показатели горных пород представлены в таблице 1. Также на основе этих данных были построены графики (рис. 2).



**Рис. 2.** Графики прочностных и деформационных характеристик для образцов из скважины (а); образцов из пещеры (б)

**Выводы.** Для образцов из керна скважины отмечаются разные значения пределов прочности и деформации, а также модуля упругости, по сравнению с образцами, отобранными из полостей массива Ледяной горы. Прочностные и деформационные показатели образцов из керна ангидрит-гипсовой породы шалашинской пачки (интервал отбора от 38,3 до 50,3 м) и гипсов неволинской пачки (интервал отбора от 50,3 м до 61,0 м) постепенно снижаются с глубиной от 47,2 м до 57,4 м.

Доломиты подошвы неволинской пачки в интервале 57,4-60,0 м имеют наименьшие значения прочности ( $\sigma_{сж}$  – 37,7 МПа;  $\sigma_r$  – 9,74 МПа), что связано с их периодичной обводненностью. Гипс, находящийся на контакте с доломитами неволинской пачки, в интервале 64,0-65,0 м., подвержен интенсивному растворению, поэтому также имеет низкие прочностные характеристики ( $\sigma_{сж}$  – 34,62 МПа;  $\sigma_r$  – 4,94 МПа). Ниже по разрезу в породах ледянопещерской пачки (интервал отбора от 61,0 м до 87,5 м) наибольшие значения прочности гипса ( $\sigma_{сж}$  – 94,28 МПа;  $\sigma_r$  – 5,17 МПа) в интервале 66,5-67,5 м возможно связаны с его перекристаллизацией. Гипсоангидритовая порода с глубины 67,5 до 86,5 м постепенно теряет прочностные и деформационные показатели, что скорее всего обусловлено увеличением трещиноватости и раздробленности массива вблизи карстовой полости КЛП. Показатели уменьшаются в пределах:  $\sigma_{сж}$  – от 69,5 МПа до 40,15 МПа;  $\sigma_r$  – от 8,15 МПа до 4,75 МПа. Для образцов из керна наименьшая прочность характерна для доломитов филипповского горизонта ( $\sigma_{сж}$  – 20,85 МПа;  $\sigma_r$  – 2,82 МПа), что связано с его постоянной обводненностью.

Таблица 1

Прочностные и деформационные показатели горных пород

Место отбора пробы	№ пробы	Краткая х-ка образцов	Глубина отбора	$\sigma_{сис}$		$\sigma_{пр}$		$\epsilon_{пр}$		$\epsilon_{пр}$		$D_{пр}$		$D_{пр}$		$E$		$M_c$	
				МПа	МПа	МПа	МПа	%	%	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа	ГПа
скважина	1	Доломит	15,0 – 18,0 м	18,00	4,28	13,63	1,06	0,78	1,69	3,05	4,89	2,57							
	2	Ангидрит-гипсовая порода	47,2-47,7 м	54,07	4,87	44,31	0,75	0,64	7,25	9,73	11,93	12,51							
	3	Линзовидно – желваковый гипс	48,1-48,6 м	52,40	5,01	39,60	0,82	0,66	7,10	9,30	11,62	10,63							
	4	Гипс мелко, среднезернистый, массивный	53,5-54,5 м	49,83	5,00	26,57	0,71	0,47	7,03	9,44	13,27								
	5	Гипс с реликтами ангидрита	54,5-55,5 м	34,62	4,94	18,46	1,46	0,92	3,77	5,70	8,03	6,90							
	6	Доломит пелитоморфный, массивный	57,4 – 60 м	37,70	9,74	31,19	2,35	1,78	2,08	3,91	5,49	4,95							
	7	Гипс	64,0- 65,0 м	23,88	2,80	12,77	3,06	1,99	0,94	1,96	4,48	4,19							
	8	Гипс	64,0- 65,0 м	94,28	5,17	46,70	1,07	0,67	8,80	11,90	11,99								
	8-1	Желваковый ангидрит	72,0 -72,5 м	45,13	6,63	19,43	0,73	0,47	5,90	8,12	11,44	12,45							
	8-2	Желваковый ангидрит с участками крупнокристаллического гипса	72,0 -72,5 м	58,25	6,48	22,77	0,83	0,43	7,03	9,10	12,15								
	8-3	Ангидрит-гипсовая порода	75,0 - 76,0 м	69,75	5,30	33,98	0,89	0,53	7,84	9,58	11,83								
	8-4	Ангидрит-гипсовая порода	79,0 – 79,5 м	69,75	8,15	35,46	0,99	0,66	7,38	9,52	10,88	7,36							
	8-5	Ангидрит-гипсовая порода	81,5 -84,5 м	56,44	5,38	38,71	1,05	0,77	5,84	8,03	10,03	12,60							
	8-6-1	Ангидрит- гипсовая порода	84,5 – 85,5 м	55,49	4,75	39,98	1,27	0,99	4,79	8,22	8,88	12,49							
	8-6-2	Ангидрит гипсовая порода	85,8 -86,0 м	42,00	6,27	28,46	1,66	0,93	3,36	6,40	7,66	8,16							
	8-6-3	Ангидрит гипсовая порода	86,5 – 87,0 м	40,15	7,31	18,74	1,14	0,66	3,80	5,04	7,93	12,35							
	9	Доломит тонкослойный, пелитоморфный	92,5 -93,0 м	20,85	2,82	11,80	0,84	0,39	2,49	5,40	9,69	11,02							
пещера	1	Гипс	52,0 -53,0	16,79	1,89	10,57	0,86	0,47	2,19	3,6	5,4	6,73							
	2	Карбонатная брекчия, неободненная	60,0 – 63,0	16,78	3,22	10,37	1,22	0,59	1,53	3,35	4,81	7,16							
	3	Карбонатная брекчия, обводненная	65,0 – 67,0 м	7,34	1,16	4,56	0,89	0,37	1,01	1,72	2,80	5,34							
	4	Гипс	60,0 – 61,0	16,60	4,78	9,02	0,96	0,52	1,80	3,25	4,37	8,51							
	5	Желваковый гипс	62,0 – 64,0	29,84	5,08	11,94	1,00	0,53	3,11	4,42	7,62	6,96							
	6	Ангидрит-гипсовая порода	64,0 – 65,0 м	40,81	3,95	20,33	0,91	0,58	4,45	6,59	10,63	10,76							
	7	Сульфатная брекчия	65,0 – 66,0	38,82	5,49	26,12	0,82	0,61	4,61	7,85	9,10	10,95							
	8	Сульфатная брекчия	68,0 – 70,0	36,78	4,08	18,41	0,85	0,42	4,47	6,61	9,13	12,28							

Доломиты подошвы неволинской пачки в интервале 57,4-60,0 м имеют наименьшие значения прочности ( $\sigma_{сж}$  – 37,7 МПа;  $\sigma_r$  – 9,74 МПа), что связано с их периодичной обводненностью. Гипс, находящийся на контакте с доломитами неволинской пачки, в интервале 64,0-65,0 м., подвержен интенсивному растворению, поэтому также имеет низкие прочностные характеристики ( $\sigma_{сж}$  – 34,62 МПа;  $\sigma_r$  – 4,94 МПа). Ниже по разрезу в породах ледянопещерской пачки (интервал отбора от 61,0 м до 87,5 м) наибольшие значения прочности гипса ( $\sigma_{сж}$  – 94,28 МПа;  $\sigma_r$  – 5,17 МПа) в интервале 66,5-67,5 м возможно связаны с его перекристаллизацией. Гипсоангидритовая порода с глубины 67,5 до 86,5 м постепенно теряет прочностные и деформационные показатели, что скорее всего обусловлено увеличением трещиноватости и раздробленности массива вблизи карстовой полости КЛП. Показатели уменьшаются в пределах:  $\sigma_{сж}$  – от 69,5 МПа до 40,15 МПа;  $\sigma_r$  – от 8,15 МПа до 4,75 МПа. Для образцов из керна наименьшая прочность характерна для доломитов филипповского горизонта ( $\sigma_{сж}$  – 20,85 МПа;  $\sigma_r$  – 2,82 МПа), что связано с его постоянной обводненностью.

Для образцов, отобранных из стен и сводов пещеры, наименьшая прочность характерна для обводненной карбонатной брекчии ( $\sigma_{сж}$  – 7,34 МПа;  $\sigma_r$  – 1,16 МПа). Наибольшая прочность наблюдается в образцах гипсоангидрита ледянопещерской пачки ( $\sigma_{сж}$  – 40,81 МПа;  $\sigma_r$  – 3,95 МПа). Для образцов гипса неволинской пачки характерны средние показатели прочности ( $\sigma_{сж}$  – 16,79 МПа;  $\sigma_r$  – 1,89 МПа).

Прочностные характеристики пещерных образцов ниже, чем у образцов пород отобранных из скважины. Так например гипсы неволинской пачки в массиве имеют показатели прочности ( $\sigma_{сж}$  – 34,62 МПа;  $\sigma_r$  – 4,94 МПа), а в пещере их прочность снижена до следующих показателей:  $\sigma_{сж}$  – 16,79 МПа;  $\sigma_r$  – 1,89 МПа. Для гипсоангидритовой породы ледянопещерской пачки в массиве показатели составляют ( $\sigma_{сж}$  – 69,75 МПа;  $\sigma_r$  – 8,15 МПа), а в пещере эти показатели снижаются до  $\sigma_{сж}$  – 40,81 МПа,  $\sigma_r$  – 3,95 МПа, соответственно. Это позволяет предполагать, что образцы, отобранные из скважины, находились под воздействием сил всестороннего сжатия и были слабо подвержены процессам выветривания, а образцы из пещеры, наоборот, испытывали сильное воздействие со стороны процессов выветривания (влажность, температурные вариации, воздействие воды и др.), происходящих в карстовых полостях. Высокие значения прочности гипса (образец № 8) из керна ( $\sigma_{сж}$  – 94,28 МПа;  $\sigma_r$  – 5,17 МПа) не соотносятся с данными графика на рис. 2-б, что, возможно, связано с недостаточным количеством отобранных образцов пещерных образцов из данного интервала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: МГГУ, 2004. – 208 с.
2. Кадебская О.И., Калинина Т. А. Литологический разрез Ледяной горы // Комплексное использование и охрана подземных пространств: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. В.С. Лукина / ГИ УрО РАН; под общ. ред. О. Кадебской, В. Андрейчука. – Пермь, 2014. – С. 42-49.