ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 551.438.8

Верификация методик определения расчетного пролета карстового провала на одном из карстовых участков в г. Дзержинске Нижегородской области

М. М. Уткин
АО «Гео Палитра»
603000, Нижний Новгород, ул. Костина, д. 3, пом. П53. E-mail: geokarst@mail.ru
(Статья поступила в редакцию 11.09.2025 г.)

Статья посвящена верификации расчетного пролета карстового провала l_d, относящегося к вероятностным методам прогнозирования деформаций. Верификация заключалась в сравнении значений расчетного пролета провала l_d, вычисленного по трем известным методикам, с диаметром карстового провала, произошедшего под фундаментом здания. По результатам верификационных расчетов только третья методика показала хороший результат, поскольку при ее разработке были устранены серьезные недостатки, присущие двум предшествующим методикам. Кроме того, доказана необходимость учета механизма провалообразования при определении величины l_d.
Ключевые слова: *карст, карстовый провал, расчетный пролет карстового провала, вероятностные методы*.
DOI: 10.17072/psu.geol.25.3.222

Введение

Одной из главных задач инженерного карстоведения, по мнению автора статьи, является выбор и определение расчетных параметров карстовых деформаций, на которые впоследствии должны выполняться расчеты прочности и устойчивости зданий и сооружений. Согласно ст. 15 ч. 6 384-ФЗ, механическая безопасность строительных объектов может быть обоснована одним из 4 способов, последний из них – *оценка риска* возникновения опасных природных процессов и явлений. Это также отражено в п. 5.1.4 СП 22.13330.2016. Так как расчетный пролет карстового провала l_d базируется на количественной оценке риска, то он наравне с другими расчетными параметрами (в частности, детерминированными) может использоваться при проектировании специальной (капитальной) противокарстовой защиты. Кроме того, возможность применения l_d закреплена в региональных методических документах Нижегородской области (Рекомендации, 2012) и Пермского края (ТСН 31-11-2005).

Объект и предмет исследования

С 80-х годов прошлого века и по настоящее время очень большое количество зданий и сооружений, причем не только на территории Нижегородской области, запроектировано с использованием расчетного пролета провала l_d. При этом ни один из строительных объектов не разрушился, не было случаев загрязнения окружающей среды, гибели людей. Последнее относится, в частности, к зданию, рассмотренному в данной статье. Таким образом, можно говорить о весьма большой апробации параметра l_d, являющегося объектом данного исследования.

© Уткин М. М., 2026

Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Возникновение карстовых провалов в основании строительных объектов – весьма редкое событие. Поэтому, помимо апробации любого расчетного параметра, намного более важным является его верификация (предмет исследования), т.е. в нашем случае – сравнение расчетного пролета провала l_d с диаметром произошедшего провала в основании сооружения. К сожалению, таких работ за последнюю четверть века автору статьи найти не удалось. Поэтому было решено в некоторой степени восполнить этот пробел, изложив верификацию параметра l_d на конкретном примере.

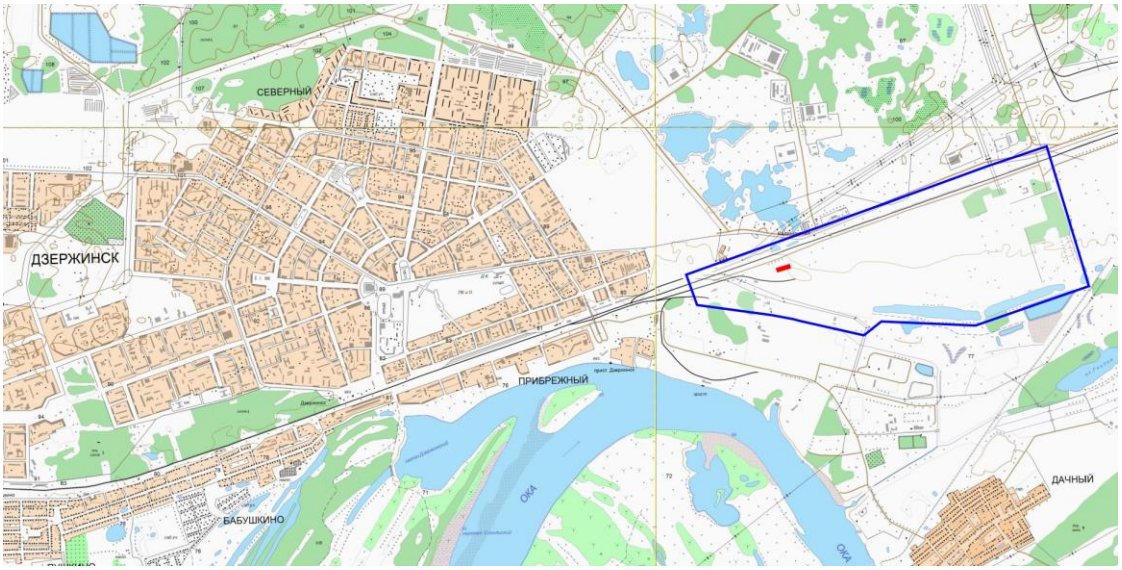
Сложность верификационных расчетов главным образом заключается в поиске строительного объекта, в основании которого произошел и должным образом был задокументирован карстовый провал, а также в наличии конструктивных решений сооружения, геолого-гидрогеологических условий участка его расположения и многолетних статистических данных по территории исследований. Последнее является желательным, но не обязательным, т.к. прогнозирование l_d может выполняться даже при полном отсутствии статистики (Уткин, 2017).

Строительный объект, на котором решено произвести верификационные расчеты, находится в восточной промышленной зоне г. Дзержинска Нижегородской области, на территории завода «Корунд», в западной его части (рис. 1).

Расчетный пролет карстового провала l_d относится к вероятностным методам прогнозирования провалообразования. Он вычисляется в рамках единой системы «карст-сооружение», т.е. совместно и наиболее полно учитывает как инженерно-геологические условия площадки, так и конструктивные решения сооружения. Начнем с рассмотрения последних.

Сведения о конструктивных решениях здания и карстовом провале, произошедшем под зданием

Выбранный объект проектировался в 1988 г. и представляет из себя производственное здание с габаритными размерами в плане в осях 1–21/А-Г – 18×108 м. В осях 1–3/А-Г располагается кирпичная пристройка к зданию, а в осях 4–21/А-Г – само одноэтажное однопролетное здание, надземные конструкции которого в основном выполнены из сборного железобетона.



Условные обозначения:

– рассматриваемое здание

– территория исследований

Рис. 1. *Ситуационная схема*

В качестве покрытия применены железобетонные плиты, а роль ограждающих стен играют керамзитобетонные панели. Каркасная часть здания, шаг колонн в которой составляет 6 м, разделена на 2 деформационных блока длиной 24 (в осях 4–8/А-Г) и 72 м (в осях 9–21/А-Г). Последний и представляет для нас практический интерес.

В каркасной части здания фундамент запроектирован ленточным из монолитного железобетона на искусственном (свайном) основании. Сваи обладают сечением 300×300 мм и проектной длиной 9 м. Высота ленточного ростверка – 1,35 м, в его углах предусмотрены балочные консоли длиной 7 м. Такое конструктивное решение фундаментов было обусловлено достаточно высоким значением рекомендуемого расчетного пролета карстового провала (l_d = 7,5 м).

18 ноября 1996 года у южной стены производственного здания (в осях 14–15/А) произошел карстовый провал (рис. 2). На момент обследования (19.11.1996 г.) его диаметр после «относительной стабилизации» составил 5,8 м, а глубина 2,2 м. Диаметр ослабленной зоны, измеренный по концентрическим трещинам (максимальная ширина раскрытия 10 мм) бетонного покрытия, составил 8,3 м (превышает диаметр провала в 1,43 раза). На керамзитобетонных панелях южного фасада были отмечены трещины, наибольшая концентрация которых наблюдалась в зоне провала. Внутри здания в осях 12–20 обнаружены места просадок грунта (пустот) под полом, а также зафиксированы деформации самой конструкции пола в виде зияющих трещин, разрушений и отрывов в месте примыкания к стенам. У северного фасада (в осях 16–21/Г) в бетонной отмостке также отмечены трещины.

а) *б)*

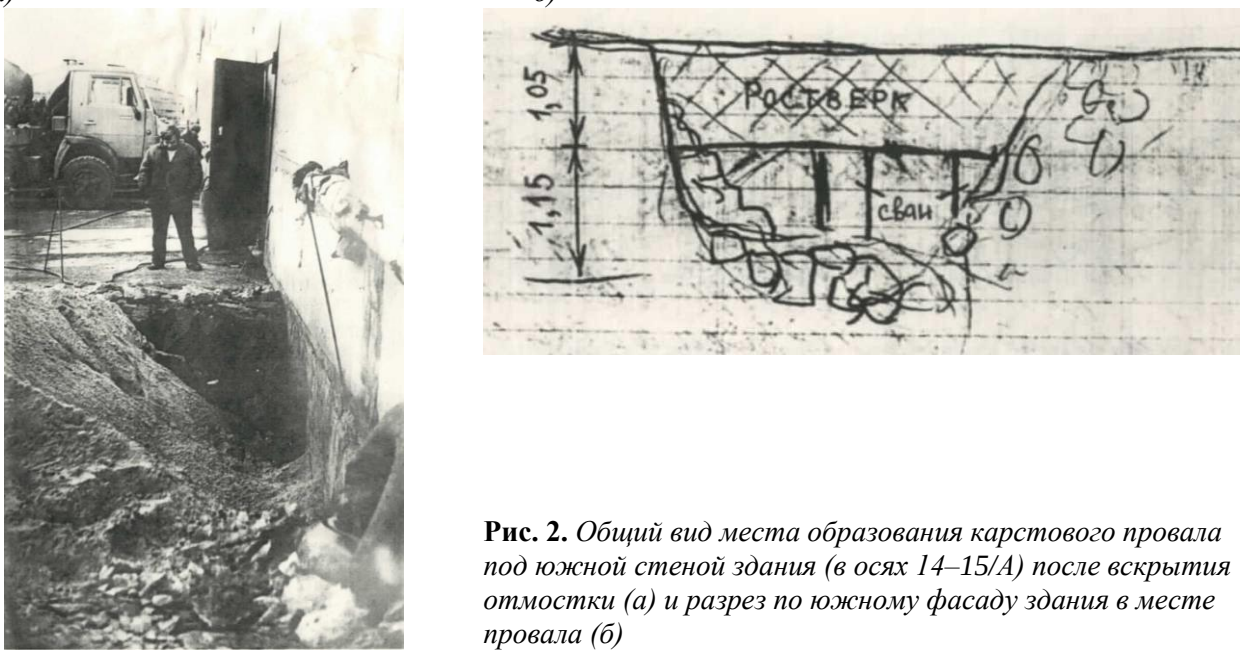


Рис. 2. *Общий вид места образования карстового провала под южной стеной здания (в осях 14–15/А) после вскрытия отмостки (а) и разрез по южному фасаду здания в месте провала (б)*

Как видно из двух вышеприведенных абзацев, расчетный пролет провала (7,5 м) неплохо коррелирует с диаметром образовавшегося карстового провала (5,8 м). К сожалению, установить методику и все исходные данные, по которым ранее выполнялись расчеты величины l_d, автору статьи не удалось (несмотря на то что по этому объекту было найдено заключение о карстоопасности).

Инженерно-геологические условия территории

Рассмотрим инженерно-геологические условия площадки расположения здания. Охарактеризуем ее геоморфологические, геологические и гидрогеологические условия. С сожалением приходится констатировать, что на самой площадке глубокие разве-

дочные (карстологические) скважины не бурились. Поэтому мощности отложений принимались по 4 близлежащим карстологическим скважинам, которые находятся с разных сторон здания, а при описании подземной закарстованности массива количество скважин было увеличено до 12. В целом территория завода «Корунд» характеризуется достаточно хорошей инженерно-геологической изученностью (на территории ~230 га пробурено более 200 карстологических скважин).

В геоморфологическом отношении площадка находится вблизи границы, разделяющей I и III надпойменные террасы р. Оки. Отметим, что на стыке геоморфологических элементов карстовая опасность может быть повышенной.

В геологическом строении площадки принимают участие отложения четвертичной и пермской систем.

Четвертичные аллювиальные отложения (a^1*IIIln-os*, a^3*IIč-ms*) представлены разнозернистыми кварцевыми песками, преимущественно мелкими. Их мощность значительно увеличивается с запада (средняя 25,8 м) на восток (средняя 35,9 м). Такая большая разность мощностей связывается некоторыми исследователями с наличием субмеридионального палеорусла (палеопротоков) с глубиной вреза в коренные породы до 10 м.

Отложения уржумского яруса пермской системы (P_2ur) распространены повсеместно. Они представлены глинами, алевритами, алевролитами, реже песчаниками. Отдельными скважинами в основании слоя вскрыты кварцевые пески, часто с гравием и галькой, которые интерпретируются как заполненные промежуточные полости. Их высота изменяется от 0,5 до 2,5 м. Мощность уржумской толщи в западной части достигает 6,9 м, на юго-востоке – 3,5 м, на северо-востоке – 12,5 м. Изложенное еще раз подтверждает наличие сложных геоморфологических условий площадки.

Отложения казанского яруса средней перми (P_2kz) сложены продуктами выветривания карбонатных пород в виде муки и обломков. Некоторыми исследователями такие интервалы описаны как заполненные карстовые полости. Редко в разрезе отмечаются трещиноватые известняки и доломиты, еще реже – незаполненные карстовые полости, фиксируемые вследствие провала бурового инструмента. Мощность казанской толщи в восточной части составляет 3,3–5,0 м, уменьшаясь в западном направлении до нуля.

Отложения сакмарского яруса нижней перми (P_1s) представлены гипсами и ангидритами. Некоторыми скважинами, как правило, в кровлевой части разреза вскрыты карстовые полости. Высота незаполненных полостей варьируется от 0,7 до 1,0 м. Заполненные полости зафиксированы только в одной из скважин.

В целом наибольшая подземная закарстованность отмечена несколько западнее площадки, где суммарно было вскрыто 8 полостей, тогда как восточнее площадки была зафиксирована всего лишь 1 полость.

Гидрогеологические условия площадки характеризуются наличием двух основных водоносных горизонтов – аллювиального и трещинно-карстового.

Аллювиальный водоносный горизонт приурочен к четвертичным отложениям. Водовмещающими породами служат пески различной крупности. Грунтовые воды безнапорные, их уровень располагается на глубине до 9,0 м. Питание горизонта в основном происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, а разгрузка – в р. Оку. Нижним относительным водоупором является толща пород уржумского яруса. Минерализация данных вод изменяется в очень широких пределах: от 0,2 г/л в верхней части разреза до 2,0 г/л и более в нижней. Поэтому они являются сильноагрессивными по отношению к карстующимся породам.

Трещинно-карстовый водоносный горизонт приурочен к казанским и сакмарским отложениям. Водовмещающими породами являются разрушенные и трещиноватые известняки и доломиты, трещиноватые и кавернозные гипсы, залегающие в основном в верхней части сульфатной толщи, а также карстовые полости. Воды горизонта напорные. Уровень их появления отмечается на глубине залегания кровли карстующихся пород, а уровень установления – обычно на 1–3 м ниже уровня грунтовых вод. На участках, характеризующихся малой мощностью

коренного глинистого водоупора, его нарушенностью или вовсе отсутствием, трещинно-карстовый и аллювиальный водоносные горизонты гидравлически взаимосвязаны. Следовательно, минерализация рассматриваемых вод также варьируется в широких пределах (1,1–3,0 г/л), что обуславливает их агрессивность или сильную агрессивность к карстующимся породам.

Область исследований, к которой относится пространство самого завода «Корунд», а также прилегающая к нему территория (рис. 1), в целом характеризуется значительной поверхностной закарстованностью. Поэтому перед началом верификационных расчетов тщательным образом были собраны имеющиеся статистические данные по поверхностным карстовым деформациям с известной датой образования.

Сбор, систематизация и обработка статистических данных о поверхностных проявлениях карста, изучение геологических условий участков их образования

Поскольку карстовый провал под рассматриваемым зданием произошел в середине ноября 1996 г., для «чистоты» верификационных расчетов сведения по поверхностным деформациям с известной датой образования отбирались до 1996 г. включительно. Анализировались различные источники информации, в случае ее расхождения окончательные данные принимались, как правило, по первоисточнику (чаще всего паспорту).

Основные сведения по поверхностным карстовым деформациям сведены в табл. 1, а их плановое расположение показано на рис. 3.

Таблица 1. *Основные сведения по поверхностным карстовым деформациям (до 1996 г. включительно), зарегистрированным на территории исследований*

№ деф. п/п	Тип деформации	Дата образования	Диаметр, d, м	Глубина, h, м	Глубинность, h/d	Форма деформации	
						в плане	в разрезе
0	провал	18.11.1996 г.	5,8	2,2	0,38	округлая	колодцеобразная
1	провал	06.08.1959 г.	25,0	9,0	0,36	округлая	конусообразная
2	провал	январь 1941 г.	22,8	5,6	0,25	округлая	конусообразная
3	провал	28.07.1960 г.	5,2	2,7	0,51	овальная	конусообразная
4	провал	05.09.1961 г.	26,0	5,5	0,21	овальная	конусообразная
5	провал	12–13.04.1964 г.	3,5	1,7	0,49	округлая	цилиндрическая
6	провал	05.10.1967 г.	9,8	2,3	0,24	округлая	конусообразная
7	локальное оседание	18–19.08.1968 г.	6,0	0,2	0,03	округлая	блюдцеобразная
8	провал	03.03.1970 г.	11,5	4,0	0,35	овальная	чашеобразная
9	провал	август 1972 г.	14,0	3,7	0,26	округлая	Неправильная (в основном конусообразная)
10	провал	март 1975 г.	23,0	8,0	0,35	овальная	конусообразная
11	провал	май 1977 г.	0,6	0,6	1,00	округлая	колодцеобразная
12	провал	09.06.1978 г.	9,0	н/д	–	округлая	н/д
13	локальное оседание	03.08.1978 г.	8,4	0,5	0,06	овальная	блюдцеобразная
14	провал	06–07.04.1980 г.	3,8	1,9	0,50	округлая	колодцеобразная
15	локальное оседание	03.07.1983 г.	3,4	0,3	0,07	округлая	блюдцеобразная
16	провал	16–17.04.1984 г.	1,5	1,9	1,31	овальная	цилиндрическая
17	локальное оседание	30–31.07.1984 г.	5,9	0,5	0,08	округлая	блюдцеобразная
18	локальное оседание	23.11.1992 г.	2,0	0,3	0,15	округлая	блюдцеобразная
19	провал	1935 г.	10,0	3,0	0,30	округлая	конусообразная

№ деф. п/п	Тип дефор-мации	Дата образования	Диа-метр, *d*, м	Глу-бина, *h*, м	Глубин-ность, *h*/*d*	Форма деформации	
						в плане	в разрезе
20	провал	начало апреля 1936 г.	5,5	2,0	0,36	округлая	н/д
21	провал	20.05.1939 г.	7,0	2,0	0,29	округлая	н/д
22	локальное оседание	август 1955 г.	6,7	0,7	0,10	округлая	блюдцеобразная
23	провал	04–05.05.1988 г.	0,8	1,0	1,33	овальная	н/д
24	провал	14.07.1988 г.	1,5	0,8	0,53	округлая	колодцеобразная
25	провал	сентябрь 1988 г.	3,5	1,0	0,29	овальная	н/д
26	провал	28.02.1989 г.	3,7	2,5	0,68	неправильная (ближе к оваль-ной)	колодцеобразная
27	провал	08–12.03.1990 г.	6,9	2,0	0,29	округлая	чашеобразная
28	провал	1990 г.	1,8	1,6	0,89	округлая	конусообразная
29	провал	01.06.1994 г.	4,5	2,0	0,44	овальная	цилиндрическая
30	провал	01.06.1994 г.	20,0	2,0	0,10	неправильная (ближе к округ-лой)	сложная (конусо-чашеобразная)
31	провал	весна 1994 г.	4,2	2,2	0,53	асимметричная	колодцеобразная
32	провал	весна 1993 г.	1,3	0,8	0,62	округлая	н/д
33	локальное оседание	октябрь 1995 г.	5,4	0,6	0,11	овальная	блюдцеобразная
34	провал	11.12.1996 г.	8,0	3,5	0,44	овальная	конусообразная
35	локальное оседание	25.11.1996 г.	10,0	н/д	-	н/д	блюдцеобразная



Рис. 3. *Плановое расположение поверхностных карстовых деформаций (до 1996 г. включительно) в пределах территории исследований*

Благодаря достаточно хорошей изученности территории исследований далее находились близлежащие карстологические скважины для всех поверхностных карстовых деформаций, для того чтобы изучить геологические условия, в которых они образовались. Вся информация приведена в табл. 2.

Таблица 2. *Геологические условия участков поверхностных карстовых деформаций, образовавшихся на территории исследований до 1996 г. включительно*

№ деф. п/п	№ п/п ближайшей глубокой скважины	Мощность отложений, м			Сведения о полостях в карстующихся породах и коренном глинистом водоупоре			
		aQ	*P_2ur*	*P_2kz*	Геол. инд.	Вид полости	Интервал глубин, м	Высота, м
0	1	32,0	12,5	3,3	–	–	–	–
	2	39,7	3,5	5,0	–	–	–	–
	3	26,4	6,4	0	*P_1s*	Незаполненная	32,8–33,8	1,0
	4	27,0	6,9	0	*P_2ur*	Заполненная	31,0–33,5	2,5
					P_1s	Незаполненная	34,0–35,0	1,0
					P_1s	Заполненная	35,0–37,2	2,2
					P_1s	Незаполненная	39,3–40,0	0,7
					P_1s	Заполненная	40,0–48,0	8,0
	5	25,5	>11,0	–	–	–	–	–
1	1	37,5	7,1	0	–	–	–	–
	2	38,0	9,5	2,8	*P_2kz*	Незаполненная	48,1–48,8	0,7
2	1	26,2	7,6	0	*P_1s*	Незаполненная	40,4–41,4	1,0
	2	24,7	9,1	0	–	–	–	–
3	1	30,4	10,9	4,4	*P_2kz*	Заполненная	41,3–45,7	4,4
	2	27,5	12,6	3,5	*P_1s*	Заполненная	44,7–44,9	0,2
4	1	24,7	9,1	0	–	–	–	–
	2	24,3	9,9	0	*P_1s*	Незаполненная	34,9–35,5	0,6
					P_1s	Заполненная	36,3–37,2	0,9
					P_1s	Незаполненная	41,7–42,6	0,9
					P_1s	Заполненная	42,6–43,4	0,8
	3	24,9	8,3	8,8	*P_2kz*	незаполненная	33,2–40,9	7,7
5	1	36,8	13,0	3,0	*P_2ur*	Заполненная	48,6–49,8	1,2
	2	33,0	10,0	4,0	*P_2kz*	Незаполненная	43,0–44,0	1,0
6	1	25,2	10,7	0	–	–	–	–
	2	21,9	>10,1	–				
7	1	27,3	9,2	0	–	–	–	–
	2	27,0	9,7	0				
	3	27,0	10,0	0				
8	1	24,7	9,1	0	–	–	–	–
9	1	24	6,1	0	*P_1s*	Незаполненная	30,5–30,8	0,3
					P_1s	Незаполненная	36,9–39,0	2,1
					P_1s	Заполненная	39,0–39,5	0,5
	2	24,2	5,6	0	*P_1s*	Заполненная	29,8–31,5	1,7
					P_1s	Незаполненная	32,7–33,2	0,5
					P_1s	Незаполненная	36,0–39,0	3,0
					P_1s	Заполненная	39,0–39,9	0,9
10	1	25,5	>11,0	–	–	–	–	–
	2	28,3	11,1	0,4				
11	1	25,5	>11,0	–	–	–	–	–
	2	28,3	11,1	0,4				
12	1	28,7	11,1	0	–	–	–	–
13	1	27,4	9,6	0	–	–	–	–
	2	24,6	15,3	0	*P_2t*	Заполненная	27,9–39,9	12,0
14	1	33,0	>15,8	–	–	–	–	–
	2	31,7	14,4	–	–	–	–	–
	3	36,8	13,0	3,0	*P_2t*	Заполненная	48,6–49,8	1,2
15	1	24,0	8,5	0	–	–	–	–
16	1	26,2	7,6	0	*P_1s*	Незаполненная	40,4–41,4	1,0

№ деф. п/п	№ п/п ближайшей глубокой скважины	Мощность отложений, м			Сведения о полостях в карстующихся породах и коренном глинистом водоупоре			
		aQ	*P_2ur*	*P_2kz*	Геол. инд.	Вид полости	Интервал глубин, м	Высота, м
17	1	27,0	10,0	0	–	–	–	–
	2	27,4	9,6	0	–	–	–	–
	3	27,2	14,0	2,2	*P_2kz*	Заполненная	41,2–43,4	2,2
18	1	27,0	10,0	0	–	–	–	–
	2	27,4	9,6	0	–	–	–	–
	3	27,2	14,0	2,2	*P_2kz*	Заполненная	41,2–43,4	2,2
19	1	27,1	9,1	0	–	–	–	–
20	2	27,2	14,0	2,2	*P_2kz*	Заполненная	41,2–43,4	2,2
21	1	29,5	10,3	1,9	–	–	–	–
	2	26,0	7,8	0,5				
22	1	29,5	10,3	1,9	–	–	–	–
23	1	29,1	>9,0	–	–	–	–	–
	2	26,7	8,2	0	–	–	–	–
	3	25,6	6,9	1,3	*P_2kz*	Заполненная	33,5–33,8	0,3
	4	27,5	6,8	0,4	*P_2kz*	Заполненная	34,6–34,7	0,1
24	1	37,5	11,0	5,8	*P_1s*	Незаполненная	55,6-56,4	0,8
25	1	29,6	>10,0	–	–	–	–	–
	2	27,5	6,8	0,4	*P_2kz*	Заполненная	34,6–34,7	0,1
26	1	26,4	6,4	0	*P_1s*	Незаполненная	32,8–33,8	1,0
27	1	28,7	11,1	0	–	–	–	–
28	1	25,5	14,0	1,3	–	–	–	–
	2	26,5	11,5	2,4				
29	1	45,0	11,5	4,9	*P_2kz*	Заполненная	56,5–61,4	4,9
	2	42,6	11,9	5,5	*P_2kz*	Заполненная	54,5–59,3	4,8
30	1	45,0	11,5	4,9	*P_2kz*	Заполненная	56,5–61,4	4,9
	2	42,6	11,9	5,5	*P_2kz*	Заполненная	54,5–59,3	4,8
31	1	25,2	10,7	0	–	–	–	–
	2	24,6	15,3	0	*P_2t*	Заполненная	27,9–39,9	12,0
	3	26,5	11,5	2,4	–	–	–	–
32	1	25,5	14,0	1,3	–	–	–	–
	2	26,5	11,5	2,4	–	–	–	–
	3	24,6	15,3	0	*P_2t*	Заполненная	27,9–39,9	12,0
33	1	22,7	10,8	0	–	–	–	–
34	1	24,2	>4,9	–	*P_2ur*	Заполненная	28,4–29,0	0,6
	2	24,5	7,6	>1,1	*P_2kz*	Незаполненная	32,1–33,2	1,1
35	1	23,8	>5,7	–	*P_2ur*	Заполненная	28,5–29,0	0,5
	2	25,5	>11,0	–	–	–	–	–

По результатам анализа сведений, приведенных в табл. 2, каких-либо «устойчивых» взаимосвязей геологических условий и размеров карстопроявлений выделить не удалось. Однако отметим несколько важных моментов.

1. Из 35 поверхностных карстовых деформаций 21 форма (№ 3, 5, 6, 10-14, 17, 18, 20, 22, 24, 27–33, 35) образовалась при мощности коренного глинистого водоупора, превышающей 10 м. В единичных случаях его мощность немного больше 15 м. Поэтому исключение толщины водоупора из всероссийских признаков оценки карстоопасности, ранее приводимых в табл. 6.16 СП 22.13330.2016, а также добавление в п. 6.12.8 указанного СП необходимости учета региональных особенностей развития карста является правильным решением.

2. Основной сложностью при выполнении инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях является установление подземной закарстованности массива. Именно она главным образом оказыва-

ет влияние на возможность возникновения и размеры поверхностных карстопроявлений. Например, две формы (№ 29 и 30) на северо-востоке исследуемой территории образовались на удалении 32 м друг от друга и в пределах одного участка, где мощность коренного глинистого водоупора составляет 11,5–11,9 м. При этом диаметры указанных карстопроявлений (d_{29} = 4,5 м, d_{30} = 20,0 м) различаются почти в 4,5 раза.

Теперь непосредственно перейдем к статистике. Согласно таблице 1, на исследуемой территории, площадь которой составляет 3,48 км^2, с 1935 по 1996 г. в общей сложности было зарегистрировано 35 поверхностных карстовых деформаций с известной датой образования. Из них 8 локальных оседаний (23 %) и 27 провалов (77 %). Следовательно, показатель интенсивности возникновения провалов $\lambda = 27 / (61 \cdot 3{,}48) =$ 0,127 пров./год·км^2, что позволяет отнести территорию ко II категории карстоопасности (Рекомендации, 1985, 1987). Важно отметить, что по карстологическому районированию г. Дзержинска 1977 г. на обширном карстовом участке, затрагивающем западную часть завода Корунд, показатель λ, вычисленный через плотность поверхностных карстопроявлений (провалов и воронок) (Ремизов и др., 1972), составил 0,18 пров./год·км^2.

Несмотря на наличие водонасыщенных песков, из 21 провала, по которым известна форма в разрезе, 10 провалов конусообразной формы (часто вверху конуса стенки провалов отвесные), 8 – цилиндрической / колодцеобразной (с отвесными стенками), 2 – чашеобразной и 1 – сложной (конусо-чашеобразной).

Средний диаметр карстовых провалов $d_{ср}$ составил 8,7 м, а максимальный d_{max} – 26,0 м (средняя глубинность – 0,50). В соответствии со статистическими данными была построена гистограмма распределения диаметров провалов (рис. 4), где отчетливо видно, что на исследуемой территории провалы могут происходить исходя из трех различных механизмов: карстово-суффозионного (17 провалов), карстово-суффозионно-обвального (5 провалов), карстово-обвального (5 провалов). Наиболее вероятным механизмом является первый. Этот момент ранее отмечался и доказан расчетами, в частности д-ром геол.-мин. наук, проф. В. П. Хоменко (Хоменко, 2015).

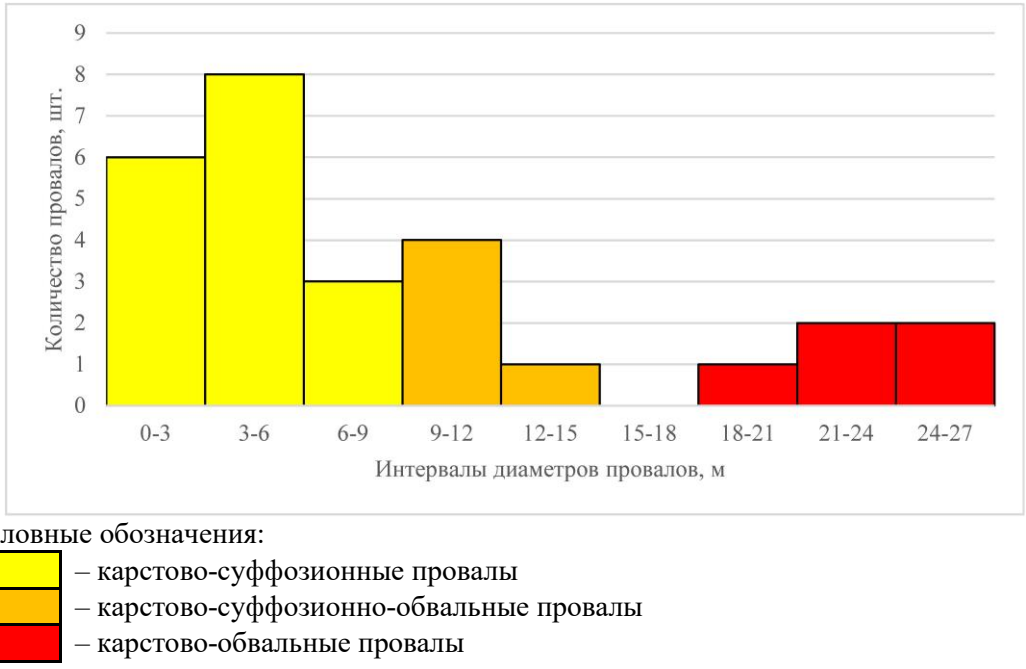


Рис. 4. *Гистограмма распределения диаметров провалов на территории исследований*

В инженерном плане не имеет большого значения, к какому закону распределения относится выборка размеров карстопроявлений (при необходимости ее можно выровнять, например, по нормальному закону). Главное, чтобы статистические данные были объективными и достоверными, а сам карстологический мониторинг по возможности продолжительным.

Остановимся на оценке вероятности возникновения карстово-обвальных провалов, характеризующихся большими размерами. Для их образования необходимо наличие в карстующейся толще крупных незаполненных полостей. Как отмечалось выше, в непосредственной близости от рассматриваемого здания было пробурено немало карстологических скважин, которыми не были вскрыты указанные полости. Кроме того, из 5 карстово-обвальных провалов 2 провала находятся в другой части завода, а остальные 3 – на значительном удалении от здания (два ближайших – в 200 м) (рис. 3). Отметим, что 3 последних провала приурочены к линеаментной зоне, простирающейся ориентировочно с юга на север и не затрагивающей площадку размещения здания.

Таким образом, при выполнении верификационных расчетов карстово-обвальные провалы не принимались во внимание, в связи с чем средний и максимальный диаметры возможных провалов существенно уменьшились (d_{cp} = 5,3 м, d_{max} = 14,0 м).

Верификационные расчеты

Определение расчетного пролета карстового провала l_d выполнялось по трем известным методикам (конкретным алгоритмам действий), основным разработчиком которых является канд. техн. наук, проф. В. В. Толмачев. Первая методика предметно изложена в Рекомендациях НИИОСП (1985) и ПНИИИС (1987), вторая – в работе (Леоненко, 2006), третья – в публикациях (Уткин, 2016, 2017, 2019). На их детальном рассмотрении останавливаться не будем. Все три методики в полной мере реализованы в программном комплексе (ПК) Karst prolet (Свидетельство, 2016), с помощью которого проводились все расчеты.

Параметры природной среды, заданные в расчетах: λ = 0,127 пров./год·км^2; распределение диаметров карстово-суффозионных и карстово-суффозионно-обвальных провалов в соответствии с гистограммой (рис. 4), согласно которой d_{cp} = 5,3 м, d_{max} = 14,0 м.

Строительные параметры приняты следующими: ленточный тип фундаментов с габаритными размерами в плане в осях 18×72 м; наличие консолей у фундаментов не учитывалось, т.к. сведения о них на этапе выполнения инженерных изысканий, как правило, отсутствуют (в данном случае наличие консолей не оказывает влияние на конечный результат расчетов – величину l_d); расчетный срок службы здания T_b = 50 лет; его минимально допустимая надежность $[P] = P_{adm}$ = 0,95 (Рекомендации, 1985, 1987); допустимый удельный карстовый риск $R_n = 1 - [P]$ = 0,05 (Рекомендации, 2012).

Расчетная схема фундаментов здания приведена на рис. 5, а интегральная кривая распределения пролетов провалов и кривая минимально допустимой надежности (применяется только во второй методике) – на рис. 6. Количество моделируемых провалов принято равным 10 000 случаев, т.к. их дальнейшее увеличение не оказывает в инженерном плане существенного влияния на величину l_d, но при этом значительно увеличивает время расчета.

Как отмечалось выше, все три методики определения расчетного пролета карстового провала l_d изложены во многих работах. Здесь только укажем результаты вычисления соответствующих вероятностей:

- первая и вторая методики: общая условная вероятность попадания под фундамент провала при его образовании внутри контура расчетной области (рис. 5) площадью $F - P_f$ = 0,352; вероятность непоражения провалом площади F, характеризуемой показателем λ, за срок службы сооружения $T_b - P_0$ = 0,983; безусловная вероятность образования провала под фундаментом – P_F = 0,006; вероятность того, что размер провала под фундаментом будет не более пролета, $l - P_{ld}$ = <0 (первая методика);

- третья методика: P_{ld} = 0,596.

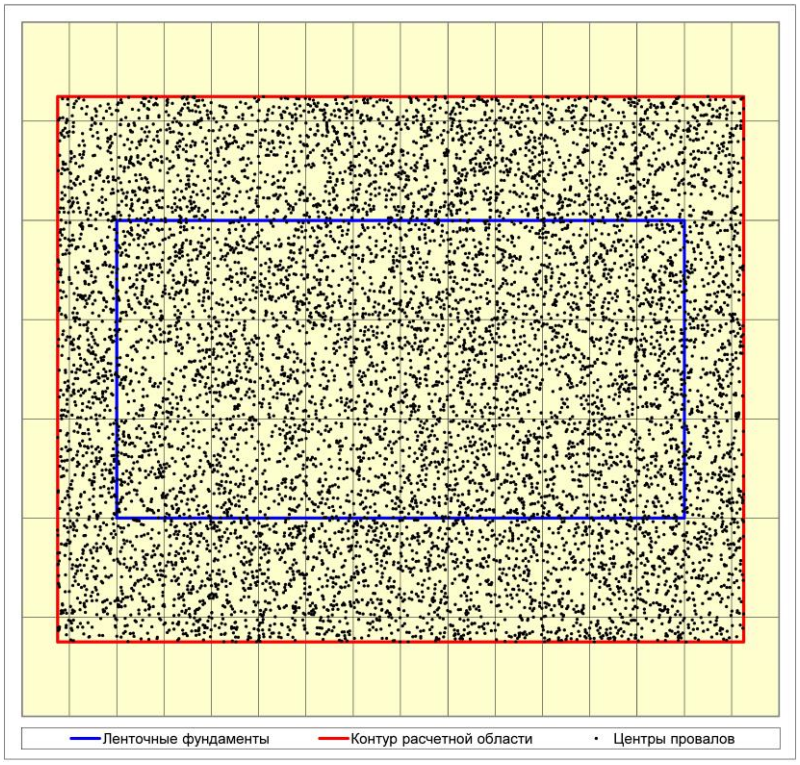
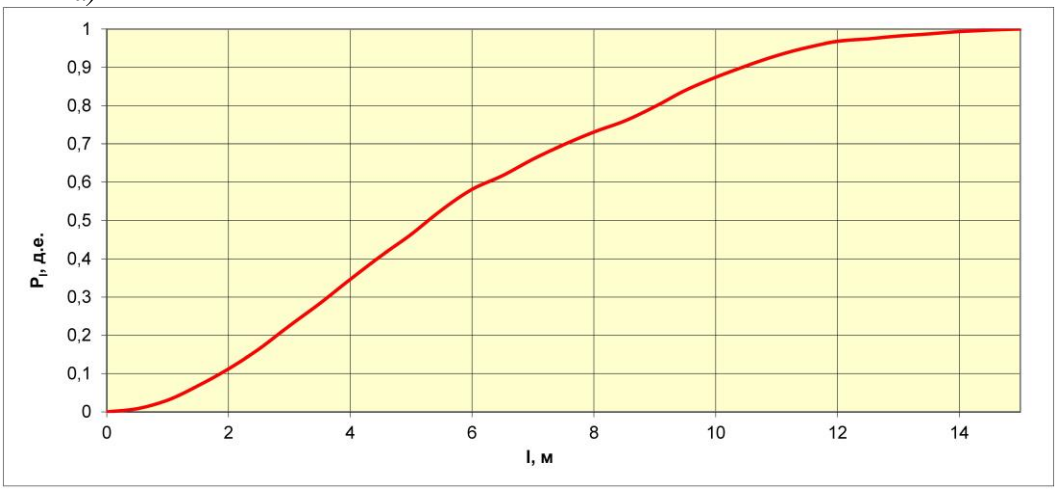


Рис. 5. *Расчетная схема фундаментов здания в ПК «Karst prolet» (Свидетельство, 2016)*

а)



б)

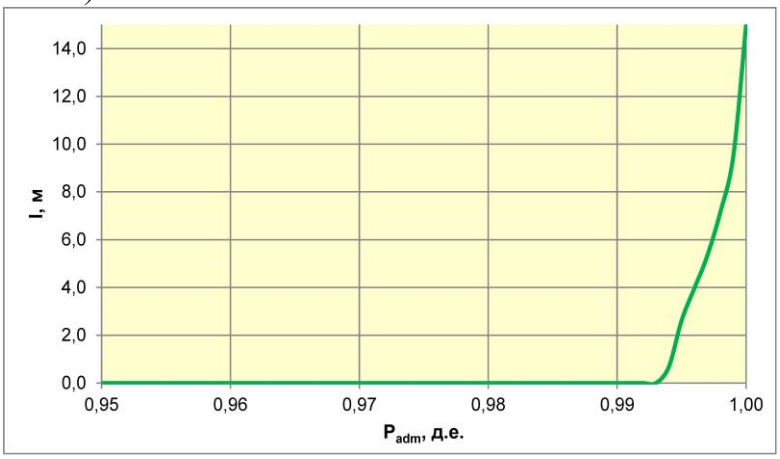


Рис. 6. *Интегральная кривая распределения пролетов провалов (а) и кривая минимально допустимой надежности (б) (Свидетельство, 2016)*

По результатам верификационных расчетов установлено, что расчетный пролет провала l_d по **первой методике** получен равным **нулю**, по **второй** – **0,9 м**, по **третьей** – **6,2 м**. Как видно из результатов расчетов, по первой методике карстовая опасность, по сути дела, отсутствует, а по второй – значительно занижена (почти в 6,5 раз). Причины, по которым это происходит, детально были рассмотрены в работе (Уткин, 2019). Применение в расчетах увеличенного значения надежности $[P] = P_{adm} = 0{,}99$, обычно принимаемого для объектов повышенного уровня ответственности, приведет к тому, что по первой методике значение величины l_d не изменится, а по второй – увеличится до 4,5 м. В последнем случае карстоопасность все равно останется заниженной (почти в 1,3 раза), хотя и не так сильно, как это имело место выше. Что касается третьей методики, то расчетный пролет провала l_d превышает диаметр произошедшего провала (5,8 м) всего лишь на 6,9 %, что говорит о правомерности использования последней методики в инженерной практике.

При проведении прогностических расчетов строго по гистограмме распределения диаметров, приведенной на рис. 4, т.е. без исключения из рассмотрения карстово-обвальных провалов, значения величины l_d получатся следующими: по первой методике – нуль, по второй – 2,2 м (–62,1 %), по третьей – 10,7 м (+84,5 %). Из приведенных результатов видно, что перед вычислением расчетного пролета провала l_d следует выполнять оценку наиболее вероятных механизмов карстового провалообразования, главным образом это актуально для сильнозакарстованных территорий (I–III категории карстоопасности).

Заключение

В качестве заключительного вывода еще раз акцентируем внимание на хорошем совпадении вычисленного расчетного пролета провала l_d (6,2 м) с диаметром произошедшего под зданием провала (5,8 м), что подтверждает возможность применения третьей методики определения l_d в инженерной практике, в том числе на стадиях проектной и рабочей документации. Дополнительно отметим, что на сильнозакарстованных территориях при расчете величины l_d следует учитывать наиболее вероятные механизмы карстового провалообразования.

Автор статьи благодарен редакционной коллегии журнала за возможность развернутой публикации статистических данных по поверхностным карстопроявлениям, а также геологическим условиям, в которых они образовались. Возможно, эти данные заинтересуют других исследователей.

Библиографический список

Леоненко В. М., Леоненко М. В., Толмачев В.В. Определение параметров проектирования противокарстовой защиты в рамках геотехнической системы «карст-сооружение» // Материалы Всероссийской конференции «РИСК-2006». М.: Изд-во РУДН, 2006. С. 315–318.

Рекомендации по использованию инженерно-геологической информации при выборе способов противокарстовой защиты / ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1987. 80 с.

Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области (утв. Департаментом градостроительного развития территории Нижегородской области). Нижний Новгород, 2012. 139 с.

Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях / НИИОСП. М., 1985. 78 с.

Ремизов В. Г., Сычева М. Д. Опыт районирования закарстованных территорий в условиях недостаточности данных об интенсивности провалов // Реферативный сборник. Инженерные изыскания в строительстве. Количественные методы изучения карста для инженерно-строительных целей. М.: ПНИИИС, 1972. Вып. 4(16). С. 15–20.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс по определению расчетного пролета карстового провала, необходимого для проектирования конструктивной противокарстовой защиты сооружений (Karst prolet) / М. М. Уткин. РОСПАТЕНТ. № 2016615566. 2016.

СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями №1, 2, 3, 4, 5). М.: Минстрой России, 2023.

ТСН 31-11-2005. Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на за-

карстованных территориях Пермского края (утв. Администрацией Пермского края). Пермь, 2005. 46 с.

Уткин М. М. Определение параметра проектирования конструктивной противокарстовой защиты с использованием уровня риска // Сергеевские чтения. М., 2016. Вып. 18. С. 225–230. EDN: VULRJV

Уткин М. М. Параметр проектирования конструктивной противокарстовой защиты сооружений. Современное состояние вопроса // Территория геотехники. 2017. № 3. С. 4–13.

Уткин М. М. Сравнительный анализ методик определения расчетного пролета карстового провала // Приволжский научный журнал. 2019. № 2. С. 61–68. EDN: VKSAIO

Федеральный закон Российской Федерации № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». М., 2009.

Хоменко В. П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Материалы Международного симпозиума «Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах». Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 50–60. EDN: VYQTGN

Verification of Probabilistic Methods for Estimation of a Collapse Span in one of the Karst Areas in Dzerzhinsk (Nizhny Novgorod Region)

M. M. Utkin
JSC Geo Palitra
3, Room 53P Kostina Str., Nizhny Novgorod 603000, Russia, E-mail: geokarst@mail.ru

This article is devoted to the verification of the estimated span of a karst collapse using the probabilistic methods of deformation prediction. Verification consisted in comparing the values of the estimated span of a collapse calculated by three known methods, with the diameter of a karst collapse occurred under the building foundation. According to the results of comparison, only the third method showed a good result, since the serious shortcomings in two previous methods were eliminated during its development. In addition, the need to take into account the mechanism of collapse formation when determining the value of its size was proven.
Keywords: *karst, karst collapse, span of karst collapse, probabilistic methods*.

Reference

Leonenko V.M., Leonenko M.V., Tolmachev V.V. 2006. Opredelenie parametrov proektirovaniya protivokarstovoy zashchity v ramkakh geotekhnicheskoy sistemy «karst-sooruzhenie» [Determination of parameters of the antikarst protection design within the karst-construction geotechnical system]. *In:* Materialy Vserossijskoy konferentsii RISK-2006. Moskva, pp. 315–318. (in Russian).

Rekomendatsii po ispolzovaniyu inzhenerno-geologicheskoy informatsii pri vybore sposobov protivokarstovoy zashchity [Recommendations for engineering-and-geological information usage for choice of the antikarst protection method]. Moskva, PNIIIS, Stroyizdat, 1987, p. 80. (in Russian)

Rekomendatsii po provedeniyu inzhenernykh izyskaniy, proektirovaniyu, stroitelstvu i ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy na zakarstovannykh territoriyakh Nizhegorodskoy oblasti [Recommendations for conducting the engineering survey, design, building and use of buildings and constructions on karst territories of Nizhny Novgorod Region]. Nizhny Novgorod, 2012, p. 139. (in Russian)

Rekomendatsii po proektirovaniyu fundamentov na zakarstovannykh territoriyakh [Recommendations for foundation design on karst territories]. Moskva, NIIOSP, 1985, p. 78. (in Russian)

Remizov V.G., Sychova M.D. 1972. Opit rayonirovaniya zakarstovannykh territoriy v usloviyakh nedostatochnosti dannikh ob intensivnosti provalov [Experience of karst territories zoning in conditions of insufficient data on the collapse intensity]. Referativniy sbornik. Inzhenernye iziskaniya v stroitelstve. Kolichestvennye metody izucheniya karsta dlya inzhenerno-stroitelnikh tseley. Issue 4 (16). Moskva, PNIIIS, pp. 15–20. (in Russian)

Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Programma dlya otsenki urovnya karstovogo riska pri inzhenerno-stroitelnom osvoenii zakarstovannykh territoriy (Karst risk) [Certificate on the state registration of the computer software. The software for assessment of karst risk level at construction development of karstified territories (Karst risk)]. ROSPATENT. № 2016615637, 2016.

SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Soil bases of buildings and structures]. SNiP 2.02.01-83*. Moskva, Minregion Rossii, 2023.

TSN 31-11-2005. Proektirovanie, stroitelstvo i ekspluatatsiya zdaniy i sooruzheniy na zakarstovannykh territoriyakh Permskogo kraya [Design, construction and operation of buildings and structures in karst areas of the Perm Region]. Perm, 2005, p. 46. (in Russian)

Utkin M.M. 2016. Opredelenie parametra proektirovaniya konstruktivnoy protivokarstovoy zashchity s ispolzovaniem urovnya riska [Determination of parameters of constructive antikarst protection design by risk level usage]. *In:* Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamentalnye problemy i prikladnye zadachi. Moskva, T.18, pp 225–230. (in Russian)

Utkin M.M. 2017. Parametr proektirovaniya konstruktivnoy protivokarstovoy zashchity sooruzheniy. Sovremennoe sostoyanie voprosa [Parameter of constructions antikarst protection design. Current problem state]. Territoriya geotekhniki. 3:4–13. (in Russian)

Utkin M.M. 2019. Sravnitelnyy analiz metodik opredeleniya raschetnogo proleta karstovogo provala [Comparative analysis of methods for definition of the karst collapse span]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. 2:61–68. (in Russian)

Federalniy zakon Rossiiskoy Federatsii № 384-FZ "Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy" [Federal act. Technical regulations on the safety of buildings and structures]. Moskva, 2009.

Khomenko V.P. 2015. Karstovoe provaloobrazovanie: mekhanizm i otsenka opasnosti [Karst sinkhole formation: mechanism and hazard assessment]. *In:* Mat. Mezhdunarodnogo simpoziuma. Ekologicheskaya bezopasnost i stroitelstvo v karstovykh rayonakh. Perm, PGNIU, pp. 50–60. (in Russian)