

Прогнозирование диаметра карстового провала в связной дисперсной и скальной толще по механизму «органных труб»: геомеханический метод и его верификация

Михаил Михайлович УТКИН^{1*}

Алексей Викторович КРАСИКОВ^{2**}

¹АО «Гео Палитра», Нижний Новгород, Россия

²Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

Аннотация

Актуальность работы. При выполнении оценки карстовой опасности территорий важнейшей задачей является выбор расчетного параметра карстовых деформаций и прогнозирование его размеров (в первую очередь диаметра). Как правило, в качестве расчетного параметра используется провал. При этом если провал прогнозируется по механизму «органных труб», то оценка его диаметра сопряжена с большими трудностями, главная из которых – отсутствие предметно изложенных и верифицированных детерминистических геомеханических (аналитических) методов.

Цель работы заключается во внедрении в инженерную практику верифицированного геомеханического метода по прогнозированию диаметра карстового провала по механизму «органных труб».

Методы исследования: полевые натурные наблюдения за очень большим количеством «органных труб»; инструментальные (геодезические) измерения размеров «органных труб» и их элементов (осыпей под «трубами», карстовых воронок над «трубами»); анализ инженерно-геологических условий, в которых образовались «органные трубы»; обобщение результатов натурных наблюдений и геодезических измерений; сравнение прогнозного диаметра провала, рассчитанного по предложенному геомеханическому методу, с фактическим (измеренным) диаметром «органной трубы» (верификация метода).

Результаты работы. Исходя из результатов обобщения многолетних натурных наблюдений и геодезических измерений, разработан геомеханический метод по прогнозированию диаметра карстового провала по механизму «органных труб». Дополнительно получены зависимости, позволяющие при наличии статистических данных учесть последующее развитие провала в воронку. Верификационные расчеты предложенных решений выполнены на примере диаметров провала и воронки, образовавшихся над одной из «органных труб», которая находится в Кунгурской ледяной пещере. Прогнозное значение диаметра провала отличается всего лишь на 6,5 % от фактического. Касаемо диаметра воронки различие еще меньше (1,4 %). На основании результатов верификации подтверждена возможность применения предложенного геомеханического метода для решения инженерных задач.

Ключевые слова: карст, карстовый провал, «органные трубы», геомеханический метод, Кунгурская ледяная пещера.

Введение

Кунгурская ледяная пещера (далее КЛП) представляет собой лабиринт, состоящий из гротов и соединяющих их более узких проходов [1], развитый на площади 0,357 км² и литологически приуроченный к сульфатно-карбонатным породам ледянопещерской и неволинской пачек кунгурского яруса нижней перми. По различным данным, в пещере имеется около 50 гротов, а общая площадь всех галерей и проходов на конец 2021 г. составила 63,8 тыс. м² [2].

Морфологию природной (естественной) карстовой полости (в нашем случае КЛП) и ее облик в значительной

мере определяют отложения. Среди форм их накоплений преобладают обвально-осыпные конусы под куполами сводов обрушения и «органные трубы».

Впервые термин «органные трубы» использовал Н. И. Каракаш в 1905 г. при описании вертикальных каналов в КЛП, так как в большинстве случаев «органные трубы» представляют собой условно округлые и эллипсоидные каналы, вертикально пронизывающие надпещерную толщу пород. Их высота достигает 10–20 м при ширине от нескольких сантиметров до 10 м. Большинство «труб» несколько расширяются к устью (низу) [3].

✉ geokarst@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-2833-8983>

** Alexeykrasikov55@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5674-1196>

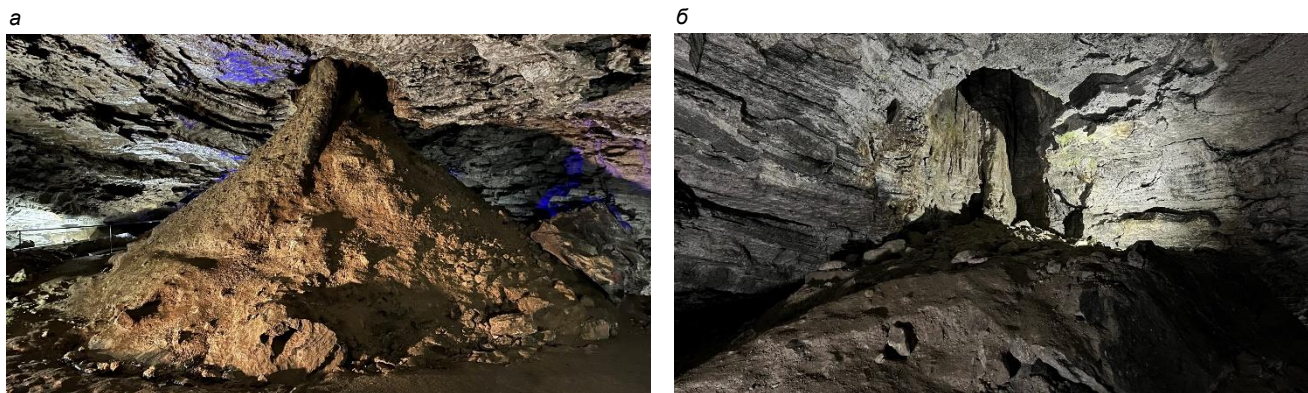


Рисунок 1. Осыпь под «органной трубой» в гроте Эфирный (а) и открытая «органная труба» в гроте Дружбы народов (б). Август 2024 г.
Figure 1. The rockslide under the “organ pipe” in the Etheric Grotto (а) and the open “organ pipe” in the Friendship of Peoples Grotto (б). August 2024

«Органые трубы» преимущественно возникают и впоследствии развиваются в наиболее ослабленных зонах, например, в местах скопления вертикальных трещин (или их пересечений), способствующих более интенсивному протеканию карстовых процессов в результате поступления в трещины пресных инфильтрационных вод.

Согласно данным предыдущих исследований [3], в КЛП всего обнаружено 146 «органых труб» с поперечником от 0,2 до 10 м (83 % – от 0,5 до 5,0 м). Из них 89 труб заполнены рыхлым грунтом, имеют под устьями конусообразные осыпи (рис. 1, а). Верхние части остальных 57 зияющих (частично доступных для наблюдений) изнутри «труб» заполнены обломками карбонатных пород и глинистых отложений (рис. 1, б). Здесь следует отметить, что деление «органых труб» на заполненные и зияющие, по ряду причин, является весьма условным. Внутри «труб» имеет место постоянная капель, минерализация которой изменяется от 1,5 до 2,3 г/л [1].

В настоящее время комплексным изучением процессов, протекающих на поверхности и внутри массива Ледяная гора, в котором находится КЛП, продолжает активно заниматься Кунгурский стационар ГИ УрО РАН. По материалам топографо-геодезических работ, проведенных в период с 2018 по 2021 г., были составлены новый топографический план пещеры и план поверхности массива в масштабе 1 : 1000 (для возможности сравнения с предыдущими исследованиями оба плана впоследствии приведены к масштабу 1 : 500 [2]), которые позволили уточнить морфометрические показатели не только самой пещеры, но и ее отдельных частей (гротов и проходов), определить пространственное положение пещеры относительно Ледяной горы.

В результате структурного картирования, выполненного в период проведения топографических работ, на план КЛП были нанесены все встреченные в пещере «органые трубы». Общее их количество составило 209, поперечником от 0,2 до 10,2 м (80 % – от 0,5 до 5,0 м). Из них 121 «трубу» можно отнести к «закрытому типу». В этом случае «трубы» заполнены рыхлым грунтом и обломками карбонатов, подошвы «труб» такого типа смыкаются с осыпями. Остальные 88 «органых труб» отнесены к так называемому «открытому типу», при котором «трубы»

частично (так как сверху перекрыты глинисто-доломитовым материалом) или полностью доступны для наблюдений. Площадь, занимаемая «органными трубами», оценена в 0,86 тыс. м², что составляет 1,35 % от всей площади пещеры.

В ходе многолетних полевых натурных наблюдений, инструментальных (геодезических) измерений и обобщения их результатов авторами статьи отмечены следующие особенности «органых труб» и обусловленных ими поверхностных карстовых форм.

1. Диаметр «органых труб», как правило, небольшой, и он слабо зависит от мощности массива пород. Кроме того, «органые трубы» образуются не одномоментно, а в результате многочисленных небольших последовательных обвалов пород. Поэтому для прогнозирования диаметра «труб» применение «классических» геомеханических методов, основанных на (а) срезе всего грунтового столба по круглоцилиндрической поверхности (модель А. Бирбаумера и ее многочисленные модификации) [4, 5, 6], (б) обрушении всей толщи грунтов в виде внутреннего параболического вывала (модель М. М. Протодьяконова) [7] или (в) комбинации указанных групп методов [8, 9], не является корректным.

2. Первоначальные размеры карстовых провалов на дневной поверхности определяются главным образом диаметром «органых труб» и высотой карстовых полостей [3]. В свою очередь, диаметр «труб» зависит от литологического состава грунтовой толщи, а высота полостей значительно влияет на объем осыпи (обрушившихся в полость грунтов).

3. На основании результатов изучения 4 воронок и осыпей объем карстовых воронок в среднем в 1,35 раза больше объема приуроченных к ним осыпей (в гроте Эфирный – в 1,34 раза) [3]. Здесь важно отметить, что отношение объемов воронок и осыпей сильно зависит от возраста первых. Отношение глубины карстовых воронок к их диаметру, также зависящее от возраста воронок и вычисленное по результатам измерений 16 форм, составляет в среднем 0,30 (для грота Эфирный – 0,52) [3].

Первые два момента учитывались при разработке геомеханического метода по прогнозированию диаметра провала, а третий – при оценке диаметра воронки.

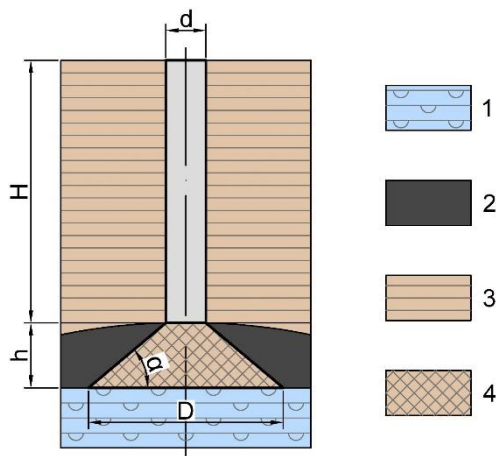


Рисунок 2. Принципиальная расчетная схема механизма обрушения грунтовой толщи в виде трубообразного канала по механизму «органных труб»: 1 – карстующаяся толща; 2 – карстовая полость; 3 – перекрывающая полость грунтовой толщи в естественном состоянии; 4 – грунты в нарушенном (рыхлом) состоянии вследствие их обрушения
Figure 2. Basic analytic model of the rock collapse mechanism in the form of a tubiform channel using the “organ pipes” mechanism: 1 – karst massive; 2 – karst cavity; 3 – overlying rock massive in its natural state; 4 – rocks in a disturbed (loose) state due to its collapse

Геомеханический метод по прогнозированию диаметра провала. В настоящее время для прогнозирования размеров карстовых деформаций разработано и успешно применяется большое количество различных методов [3–11]. Так, в работах [10, 11] предлагается выполнять прогноз возникновения карстово-суффозионных провалов с помощью математического моделирования и использования данных электрометрических и сейсмологических исследований. Необходимо отметить, что в инженерном карстоведении немало методов заимствовано из горного дела, где, например, рассматриваются вопросы прогнозирования провалообразования на земной поверхности под воздействием подземной добычи полезных ископаемых [12]. Однако применение распространенных методов для определения диаметра карстового провала по механизму «органных труб» не представляется возможным.

Перейдем непосредственно к прогнозированию диаметра трубообразного канала d , м, в перекрывающей карстовую полость толще, которая может быть сложена связными дисперсными и (или) скальными (в том числе полускальными) грунтами. При этом в зависимости от решаемой задачи, механизма возникновения провала в ходе выполнения аналитических расчетов может рассматриваться не вся указанная толща, а только ее расчетные участки. Принципиальная расчетная схема предлагаемого геомеханического метода приведена на рис. 2.

Объем грунтовой толщи, заключенной внутри трубообразного канала V_1 , м³, с учетом разрыхления грунтов при их обрушении вычисляется по формуле

$$V_1 = K_p \pi \frac{d^2}{4} H, \quad (1)$$

где H – мощность перекрывающей полость толще, представленной связными дисперсными и (или) скальными (в том числе полускальными) грунтами, или же суммар-

ная мощность расчетных участков указанной толщи (в зависимости от решаемой задачи, механизма возникновения деформаций), м; K_p – коэффициент разрыхления грунтов, характеризующий увеличение их объема при дроблении (разрыхлении). Его можно оценить по формуле

$$K_p = \frac{\rho}{\rho_p}, \quad (2)$$

где ρ , ρ_p – плотность грунта в естественном (плотном) и раздробленном (рыхлом) состояниях соответственно.

Значения коэффициента разрыхления грунтов варьируются в достаточно широких пределах. Например, для цементированных грунтов (суглинки, глины, аргиллиты), которые характеризуются послойным фрагментарным обрушением, $K_p = 1,1–1,3$, а для скальных (в том числе полускальных) грунтов (мергели, мел, гипсы, ангидриты, известняки, доломиты), испытывающих в основном блоковое обрушение, $K_p = 1,3–2,0$ [3]. Однако здесь следует учитывать, что в течение длительного промежутка времени обрушившиеся в карстовую полость грунты могут существенно уплотниться. Следовательно, коэффициент K_p может оказаться ниже его минимальных значений. Видимо, поэтому различают первоначальное и остаточное разрыхление грунтов. В случае разнородной покровной толщи K_p может приниматься средневзвешенным по глубине.

Объем обрушившихся грунтов (осыпи) в форме усеченного конуса V_2 , м³, определяется согласно следующему выражению:

$$V_2 = \frac{1}{12} \pi h (D^2 + Dd + d^2), \quad (3)$$

где h – высота карстовой полости, м; D – диаметр нижнего основания конуса обрушения, м, вычисляемый следующим образом:

$$D = d + 2 \frac{h}{k}, \quad (4)$$

где k – коэффициент трения, $k = \operatorname{tg} \alpha$; α – угол естественного откоса обрушившихся грунтов, главным образом, зависящий от типа грунта и гидрогеологических условий в зоне полости (по наблюдениям авторов статьи, в необводненных условиях обычно находится в пределах от 30 до 50°), град.

Допуская равенство объемов V_1 , V_2 и опуская промежуточные вычисления, получим следующее уравнение:

$$(h - K_p H) d^2 + \frac{2h^2}{3k} d + \frac{4h^3}{3k^2} = 0. \quad (5)$$

Выполним решение данного квадратного уравнения, для чего примем следующие обозначения:

$$a - \text{коэффициент перед } d^2, \text{ м, } a = h - K_p H; \quad (6)$$

$$b - \text{коэффициент перед } d, \text{ м}^2, b = \frac{2h^2}{3k}; \quad (7)$$

$$c - \text{свободное число, м}^3, c = \frac{4h^3}{3k^2}. \quad (8)$$

Запишем уравнение (5) в сокращенном виде:

$$ad^2 + bd + c = 0. \quad (9)$$

Единственное его решение имеет следующий вид:

$$d = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (10)$$

Полученная формула применяется при условии, когда не исключено провалообразование по механизму «органной трубы». По своему физическому смыслу величина d при определенных условиях может считаться равной максимальному диаметру трубообразного канала или максимальному первоначальному диаметру карстового провала d_{\max} . Относительно последнего отметим, что практически аналогичного мнения также придерживается В. Н. Андрейчук [3].

Прогнозирование диаметра карстовой воронки.

Не менее интересна задача прогнозирования диаметра карстовой провальной воронки d_b , м, на необходимый момент времени. Решение такой задачи, с инженерной точки зрения, можно выполнить исходя из формы воронки в разрезе, ее возраста и объема осыпи.

В случае если воронка характеризуется чашеобразной формой, ее объем V_3 , м³, вычисляется по формуле

$$V_3 = \pi h_a^2 \left(\frac{d_b}{2} - \frac{h_a}{3} \right). \quad (11)$$

Возраст воронки может определяться отношением ее глубины h_a к диаметру d_b . Обозначим это отношение через коэффициент k_b , обычно именуемый в литературе коэффициентом глубинности:

$$k_b = h_a / d_b. \quad (12)$$

Так, для грота Эфирный, где обвальные процессы на сегодняшний день не стабилизировались, коэффициент $k_b = 0,52$, что в 1,73 раза превышает среднее значение $k_b = 0,30$ [3].

Как отмечалось ранее, объем воронки V_3 , как правило, больше объема приуроченной к ней осыпи V_2 . Для удобства сравнения обозначим отношение объемов через коэффициент k_v :

$$k_v = \frac{V_3}{V_2}. \quad (13)$$

Решая совместно выражения (11)–(13) относительно диаметра d_b , получим следующую формулу его определения:

$$d_b = \sqrt[3]{\frac{k_v V_2}{\pi k_b^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{k_b}{3} \right)}}. \quad (14)$$

Аналогичную формулу можно вывести и для блюдцеобразной (конусообразной) воронки:

$$d_b = \sqrt[3]{\frac{12k_v V_2}{\pi k_b}}. \quad (15)$$

Верификация геомеханического метода. Для возможности использования в инженерной практике предложенного геомеханического метода выполнена его верификация на примере «органной трубы», находящейся в КЛП.

До настоящего времени на Ледяной горе пробурено только две глубоких разведочных скважины (№ 4443 и 4444) [13, 14], геологический разрез по которым приведен в работе [14]. Поэтому для верификационных расчетов в первую очередь отбирались «органная труба», находящиеся на минимальном удалении от скважин. К сожалению, вблизи скважины № 4443 «органная труба» отсутствуют. Далее из полученной выборки окончательно была выбрана «труба» с реализованной опасностью (т. е. та, которая в пещере имеет осыпь, а на горе проявилась в виде воронки) и расположенная вне краевой части свода пещеры. Таковой является «органная труба», находящаяся в гроте Эфирный (рис. 1, а), в 25 м от ствола скважины. На дневной поверхности над «трубой» имеется блюдце-чашеобразная (по топографической съемке сверху чашеобразная форма, ближе к низу – блюдцеобразная) карстовая воронка (рис. 3) диаметром $d_b = 16,3$ м (площадь 209,02 м²) и глубиной $h_b = 5,4$ м.

Выбранная «органная труба», как и подавляющее большинство аналогичных «труб», не является идеально круглой. По всей видимости, на это в первую очередь повлияли неравномерная трещиноватость пород и неравномерное обтекание инфильтрационных вод по периметру «трубы». Поэтому с использованием площади поперечного сечения низа «трубы» (8,29 м²) вычислен ее приведенный диаметр d , который составил 3,2 м. Далее изложено прогнозирование d по предлагаемому геомеханическому методу.

Мощность связной дисперсной и скальной толщи H , используемая в расчете, определялась исходя из вероятного механизма развития выбранной «органной трубы», который в виде схемы проиллюстрирован на рис. 4 и изложен далее. На всех этапах развития «органной трубы», кроме первого, диаметр трубообразного канала является небольшим, поэтому он показан условно.



Рисунок 3. Карстовая воронка на Ледяной горе, образовавшаяся над рассматриваемой «органной трубой» в гроте Эфирный. Август 2024 г.
Figure 3. A sinkhole on Ledyanaya Gora formed above the “organ pipe” in the Ether Grotto. August 2024

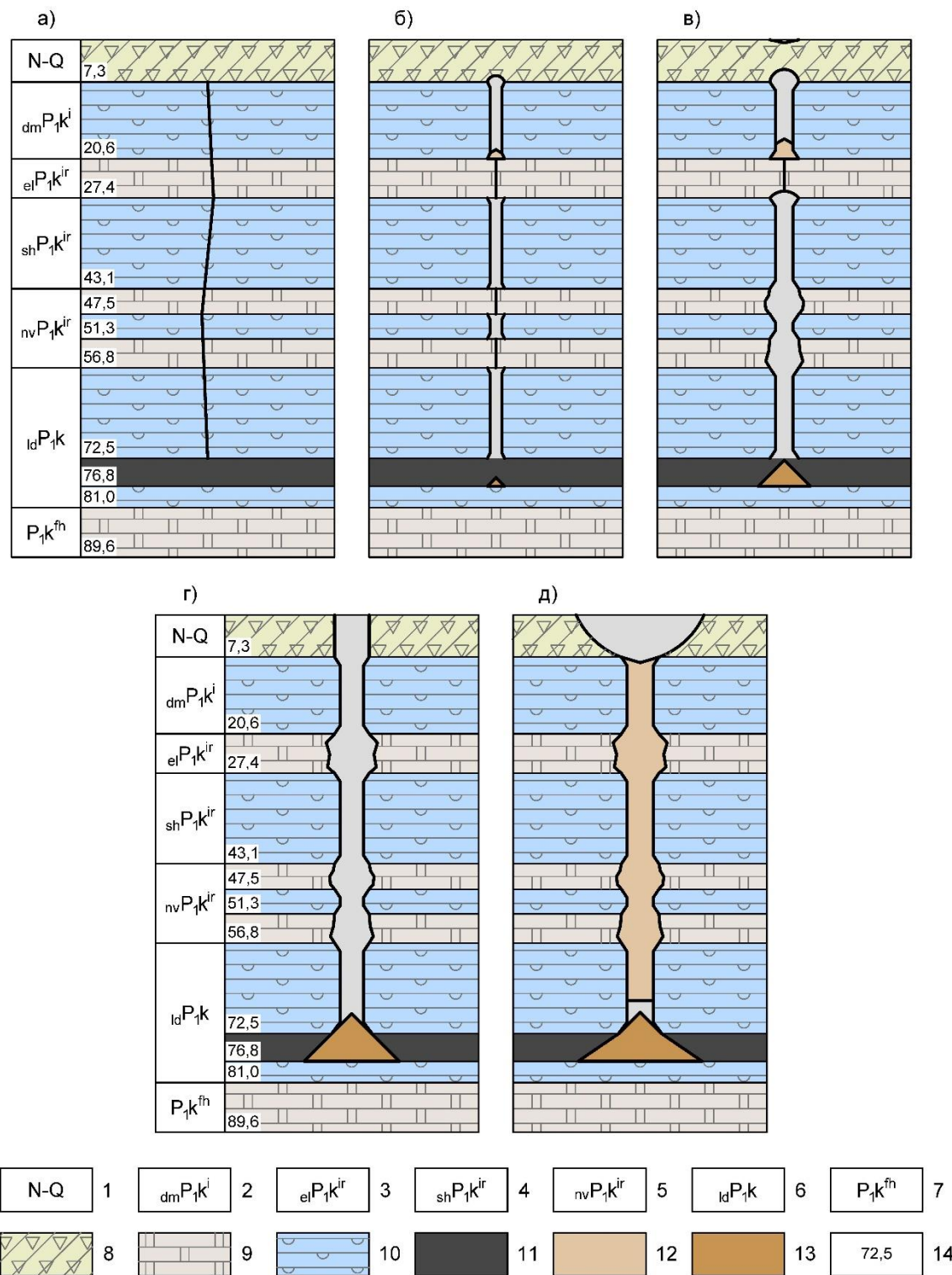


Рисунок 4. Схема механизма развития выбранной «органической трубы» в гроте Эфирный: 1 – неоген-четвертичная система; 2–6 – пачки (2 – демидковская; 3 – елкинская; 4 – шалашинская; 5 – неволинская; 6 – ледянопещерская); 7 – филипповский горизонт; 8 – древесно-щебенистый материал доломита с прослоями полутвердых суглинки и глины; 9 – доломит; 10 – гипс, ангидрит; 11 – карстовая полость (пещера); 12 – обрушившиеся грунты с полыми участками внутри трубообразного канала; 13 – обрушившиеся грунты, слагающие тело осыпи; 14 – глубина подошвы слоя

Figure 4. Scheme of the development mechanism of the “organ pipe” in the Efirny Grotto: 1 – Neogene-Quaternary system; 2–6 – members (2 – Demidkovskaya; 3 – Elkinskaya; 4 – Shalashninskaya; 5 – Nevolinskaya; 6 – Ledyanopesherskaya); 7 – Filippovsky horizon; 8 – gruss-rubble dolomite material with loam and clay interlayers; 9 – dolomite; 10 – gypsum, anhydrite; 11 – karst cavity (cave); 12 – collapsed soils with hollow areas inside the pipe-shaped channel; 13 – collapsed soils of rockslide; 14 – depth of the base of the layer

Образование «органной трубы» начинается в месте пересечения сквозных субвертикальных трещин, возникших вследствие тектонических нарушений в массиве (рис. 4, а). Дальнейшее их развитие можно разделить на 2 основных этапа [1].

На первом этапе расширение трещин происходило в условиях *гипогенного карста*, т. е. под действием подземных (напорных восходящих) вод, обладающих высокой температурой и приуроченных к соответствующим интервалам в карстующейся толще. Со временем первый этап сменился вторым (*эпигенный карст*), где развитие трещин и по сей день происходит в результате протекания по ним поверхностных (инфильтрационных дождевых и талых) пресных вод.

Подземные и поверхностные воды, проходящие по трещинам, приводят к расширению трещин главным образом в сульфатных породах, поскольку они, в отличие от труднорастворимых карбонатных пород, являются среднерастворимыми [15]. В результате изложенного формируется трубообразный канал, который в сульфатах в местах входа и выхода воды немного расширяется (рис. 4, б). Это достаточно известный факт, неоднократно наблюдаемый авторами в ходе лабораторного физического моделирования процессов растворения карстующихся пород [15]. Кроме того, сульфатные породы на контакте с карбонатными часто характеризуются повышенной нарушенностью, что также обуславливает расширение канала.

При достижении трубообразным каналом определенных пролетов (диаметров) будет происходить дискретное (блоковое) обрушение сначала неволинских карбонатов (рис. 4, в), затем елкинских (рис. 4, г). Такая последовательность обусловлена как минимум двумя основными причинами.

Во-первых, мощностью пород. Мощность слоев неволинских доломитов (4,4 и 5,5 м) в 1,55 и 1,25 раза меньше, чем у елкинских (6,8 м).

Во-вторых, прочностью пород. Согласно результатам лабораторных испытаний, проведенных в ГИ УрО РАН, прочность на одноосное сжатие оолитовых доломитов (средняя 77,76 МПа) елкинской (20,6–27,4 м) и нижней половины нижнего слоя неволинской (54,0–56,8 м) пачки в среднем в 2,24 раза больше прочности остальных доломитов (средняя 34,74 МПа), слагающих верхний слой (43,1–47,5 м) и верхнюю половину нижнего слоя (51,3–54,0 м) неволинской пачки. Это объясняется тем, что верхний доломитовый слой неволинской пачки значительно загипсован и содержит открытые трещины, а верхняя половина нижнего слоя неволинской пачки представлена глинистым органогенным очень пористым кавернозным доломитом.

Отдельно отметим, что обрушаться также могут и некоторые маломощные прослои сильнотрещиноватых сульфатов. Однако их вклад в увеличение объема осыпи рассматриваемой «органной трубы» в инженерном плане ничтожно мал.

В результате обрушения неволинских карбонатов в пещере возникнет конусообразная осыпь, а на кровле елкинских карбонатов будут залегать частично обрушившиеся неоген-четвертичные отложения. Тем самым «органная труба» будет характеризоваться несколькими

ярусами. Дальнейшее обрушение елкинских карбонатов значительно увеличит объем осыпи, а сама она будет состоять уже из карбонатных и неоген-четвертичных отложений. «Органная труба» становится одноярусной и выходит на дневную поверхность в виде карстового провала.

Далее в течение очень долгого времени карстовый провал будет развиваться в провальную воронку за счет обрушения и выполаживания его бортов (рис. 4, д). Пространство трубообразного канала постепенно будут заполнять в первую очередь весьма рыхлые (по сравнению с осыпью) неоген-четвертичные отложения. В настоящее время в канале, исходя из сравнения его ориентировочного объема (~600,7 м³) с объемами воронки (~447,8 м³) и осыпи (~334,1 м³), имеются многочисленные полые участки, объем которых оценить, ввиду недоступности обследования внутреннего пространства всего канала, не представляется возможным. Натурными измерениями установлено только то, что последние метры канала не заполнены. В дальнейшем после относительно полного заполнения «органной трубы» развитие воронки будет зависеть в основном от скорости уплотнения обрушившихся отложений и выполаживания самой осыпи. Последние два процесса главным образом обусловлены действием вод (движением воды в канале, капелью из «трубы» и редкими затоплениями пещеры), вследствие чего дисперсные отложения переходят из полутвердого в текучепластичное и текучее состояние, что приводит к их перемещению сначала вниз, затем в стороны, т. е. к массовой механической суффозии. Однако, несмотря на изложенное, в инженерном плане развитие воронки в целом можно считать завершенным.

Таким образом, на заключительном этапе формирования провала осыпь в основном сложена обрушившимися неоген-четвертичными и карбонатными породами. Поэтому суммарная расчетная мощность связанной дисперсной (7,3 м) и скальной (16,7 м) толщи H принята равной 24,0 м.

Высота карстовой полости h рассчитывалась в 17 точках как разность высотных абсолютных отметок между низом «органной трубы» и подошвой осыпи. Среднее значение h получено равным 4,3 м.

У осыпи обрушившихся грунтов угол естественного откоса α не является постоянным (например, как видно из рис. 1, а, кверху значительно увеличивается), что говорит о незавершенности процессов обрушения. Определение величины α осуществлялось через высоту полости h , а также диаметры верхнего ($d' = 2,7$ м) и нижнего ($D = 15,7$ м) оснований осыпи, которые, в свою очередь, вычислены исходя из площадей оснований. В итоге угол α составил 33,5°.

Коэффициент разрыхления K_p для каждого класса грунтов принимался минимальным, так как в течение длительного времени грунты осыпи заметно уплотнились. В расчете использовалось средневзвешенное по глубине значение K_p , которое получено равным 1,24.

Подставляя приведенные исходные данные в формулы (6)–(8), получим, что коэффициент $a = -25,45$ м, $b = 18,54$ м², а свободное число $c = 240,26$ м³. Следовательно, расчетный диаметр «органной трубы» (трубообразного канала) d , вычисленный по формуле (10), составил 3,5 м. Спрогнозированное значение превышает измеренное (3,2 м) всего лишь на 6,5 %, что позволяет говорить о

достоверности предложенного геомеханического метода и правомерности его использования для решения инженерных задач.

Отдельно отметим, что если в расчете диаметр верхнего основания осыпи d' принять равным диаметру трубообразного канала d , как это показано на рис. 2, то величина d получится равной 3,3 м, а различие прогнозного и измеренного значений d уменьшится с 6,5 до 2,4%.

Теперь выполним прогнозирование диаметра карстово-провальной воронки d_b над рассматриваемой «органической трубой» на настоящий момент времени.

Объем осыпи V_2 , вычисленный по выражению (3), исходя из высоты полости h и диаметров оснований осыпи (d', D), составил 334,1 м³.

Возраст воронки учитывался через коэффициент глубинности, который определялся согласно формуле (12) и составил $k_b = 0,33$.

На основании имеющихся статистических данных по сравнению объемов воронок и осыпей коэффициент k_v (см. (13)) принят равным 1,34.

Подставляя приведенные исходные данные в формулы (14) и (15), получим расчетный диаметр d_b чашеобразной карстовой воронки 14,9 м, а блюдцеобразной – 17,3 м. Поскольку рассматриваемая воронка блюдце-чашеобразной формы, то в качестве окончательного значения d_b принято среднее значение вычисленных диаметров, которое составило 16,1 м. Спрогнозированное значение меньше фактического (16,3 м) всего лишь на 1,4 %, что говорит о достоверности предложенного решения и возможности его применения в инженерной практике.

Верификацию геомеханического метода по возможности необходимо продолжать. Верификация любых подобных методов сдерживается, как правило, отсутствием должным образом задокументированных случаев провалобразования и выполненных по ним исследований (бурение глубоких скважин, геофизические и лабораторные исследования и др.).

Заключение

На основании результатов проведенных верификационных расчетов можно констатировать, что предложенный геомеханический метод может применяться для решения инженерных задач, а именно для прогнозирования диаметра карстового провала по механизму «органических труб». Кроме того, при необходимости можно учесть последующее развитие провала в воронку.

Разработанный геомеханический метод также может быть полезен при оценке устойчивости (надежности) мощного глинистого водоупора, поскольку по результатам выполнения такой оценки «классическими» способами (одномоментное обрушение водоупора по круглоцилиндрической поверхности или в виде параболического вывала, а также их комбинация) зачастую получается, что водоупор устойчив (не способен обрушиться). Однако в ряде случаев (например, при наличии поверхностной или существенной подземной закарстованности) сделанный вывод весьма дискуссионный. Именно поэтому целесообразно рассмотреть нарушение сплошности водоупора в виде возникновения в нем сквозных субвертикальных трещин или трубообразных каналов. Последний случай является наиболее опасным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / В. Н. Дублянский [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 375 с.
2. Красиков А. В. Уточнение морфометрических показателей гротов и галерей Кунгурской ледяной пещеры по результатам топографо-геодезических работ // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 4. С. 76–89. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-4-76-89>
3. Андрейчук В. Н. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Прут, 1999. 52 с.
4. Кутепов В. М. Оценка устойчивости закарстованных территорий методом анализа напряженного состояния массивов горных пород. М.: ЦП НТГО, 1986. 68 с.
5. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий / под ред. Е. А. Сорочана. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
6. Яковлева Т. Г. Определение зоны безопасности при проектировании противокарстовых мероприятий // Труды МИИТ, вып. 111. М., 1960. С. 150–163.
7. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. 1: Давление горных пород. 2-е изд. М.; Л.: Гостехиздат, 1931. 104 с.
8. Постолев Г. П. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 4. С. 36–47. <https://doi.org/10.31857/S0869780920040086>; <https://www.elibrary.ru/cigtww>
9. Хоменко В. П., Леоненко М. В., Дзущев А. О. Сравнительная оценка трех способов расчета диаметра карстово-обвального провала «простого» типа // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 1. С. 41–49. <https://doi.org/10.31857/S086978092301006X>; <https://www.elibrary.ru/hsngwb>
10. Cuevas Castellanos P., Krivosheya K. V., Shevnev V. A., Pavlova A. M., Ryjov A. A., Bobachev A. A. Modeling of sinkholes effects caused by karst and suffosion as anomalies of resistivity method // 9th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. Gelendzhik, 2013. P. 1–8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142503>
11. Pisetski V. B., Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Savintsev I. A., Serkov V. A. The study of karst processes according to the electromagnetic and seismic observations // 12th conference and exhibition engineering geophysics. Anapa, 2016. P. 161–164.
12. Abdibaitov Sh. A., Khussan B., Ivadiilina D. T., Lozynskiy V. H. Methods for prediction of the conditions of dip formation on the ground surface during underground development ore deposits // Горный журнал Казахстана. 2022. № 10. С. 32–37. <https://doi.org/10.48498/minmag.2022.210.10.003>; URL: http://elib.kstu.kz/fulltext/temat/2022/Gornyy_zhurnal_32_37.pdf
13. Кадебская О. И., Калинина Т. А. Литологический разрез Ледяной горы // Комплексное использование и охрана подземных пространств: сборник докл. Междунар. науч.-практ. конф. Пермь, 2014. С. 42–49.
14. Красиков А. В., Трапезников Д. Е. Новые данные о литологическом разрезе массива Ледяной горы // Горное эхо. 2020. № 4. С. 24–30. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.4.5>
15. Уткин М. М., Уткин М. В. Практический опыт определения скорости растворения карстующихся пород в лабораторных условиях на одном из этапов скоростной автомобильной дороги М-12 «Москва–Нижегород–Казань» // Приволжский научный журнал. 2022. № 2. С. 90–99.

Статья поступила в редакцию 09 декабря 2024 года

Prediction of a karst collapse diameter in a coherent dispersed and hard-rock massive using the “organ pipes” mechanism: a geomechanical method and its verification

Mikhail Mikhailovich UTKIN^{1*}

Aleksey Viktorovich KRASIKOV^{2**}

¹JSC “Geo Palitra”, Nizhny Novgorod, Russia

²Mining Institute of the Ural Branch of RAS, Perm, Russia

Abstract

Relevance of the research. The choice of the calculation parameter of karst deformations and forecasting its size is the most important task when assessing the karst danger of territories. As a rule, a collapse is used as a calculation parameter. When predicting a collapse using the “organ pipe” mechanism, estimating its diameter presents severe difficulties. The main one is the lack of described and verified deterministic geomechanical (analytical) methods.

The aim of the research is to introduce into engineering practice a verified geomechanical method for predicting the diameter of a karst failure using the “organ pipe” mechanism.

Research methods: field observations of a very large number of “organ pipes”; instrumental (geodetic) measurements of the “organ pipes” sizes and their elements (rockslides under the “pipes”, karst sinkholes above the “pipes”); analysis of engineering-and-geological conditions in which the “organ pipes” were formed; generalization of the results of field observations and geodetic measurements; comparison of the predicted diameter of the failure, calculated using the proposed geomechanical method, with the actual (measured) diameter of the “organ pipe” (verification of the method).

Results of the research. Generalization of the results of long-term field observations and geodetic measurements allowed us to develop a geomechanical method for predicting the diameter of a karst sinkhole using the mechanism of “organ pipes”. Dependencies were obtained that allow us to take into account the subsequent development of a sinkhole into a funnel. Verification calculations of the proposed solutions were performed using the example of the diameters of a sinkhole and a funnel formed above one of the “organ pipes”, which is located in the Kungur Ice Cave. The predicted value of the sinkhole diameter differs from the actual one by only 6,5 %, and the diameter of the funnel by 1.4 %. Based on the verification results, the possibility of using the proposed geomechanical method to solve engineering problems was confirmed.

Keywords: karst, karst collapse, “organ pipe”, geomechanical method, Kungur Ice Cave.

REFERENCES

1. Dublyansky V. N. et al. 2005. Kungur Ice Cave: an experience of regime observations. Ekaterinburg, 375 p.
2. Krasikov A. V. 2022. Clarification of morphometric indicators of grottoes and galleries of the Kungur Ice Cave based on the results of topographic and geodetic works. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], no. 4, pp. 76–89. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-4-76-89>
3. Andreychuk V. N. 1999. Sinkholes above gypsum labyrinth caves and assessment of the stability of karst territories. Chernivtsi, 52 p.
4. Kutepov V. M. 1986. Assessment of the stability of karst territories by the method of analysis of the stress state of rock massifs. Moscow, 68 p.
5. Tolmachev V. V., Troitsky G. M., Khomenko V. P. 1986. Engineering and construction development of karst territories. Ed. by E. A. Sorochan. Moscow, 176 p.
6. Yakovleva T. G. 1960. Definition of the safety zone in the design of anti-karst procedure. Works of MIIT, Vol. 111. Moscow, P. 150–163.
7. Protodyakonov M. M. 1931. Rock pressure and mine support. Part one: Rock pressure. 2nd ed. Moscow; Leningrad, 104 p.
8. Postoev G. P. 2020. Models of the mechanism of formation and calculation of parameters of failures of the earth’s surface above underground cavities. *Geoecologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, Hydrogeology, Geocryology], no. 4, pp. 36–47. <https://doi.org/10.31857/S0869780920040086>; <https://www.elibrary.ru/cigtww>
9. Khomenko V. P., Leonenko M. V., Dzutsev A. O. 2023. Comparative assessment of three methods for calculating the diameter of a karst-landslide failure of the “simple” type. *Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, Hydrogeology, Geocryology], no. 1, pp. 41–49. <https://doi.org/10.31857/S086978092301006X>; <https://www.elibrary.ru/hsgnwb>
10. Cuevas Castellanos P., Krivosheya K. V., Shevnev V. A., Pavlova A. M., Ryjov A. A., Bobachev A. A. 2013. Modeling of sinkholes effects caused by karst and suffosion as anomalies of resistivity method. 9th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. Gelendzhik, pp. 1–8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142503>
11. Pisetski V. B., Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Savintsev I. A., Serkov V. A. 2016. The study of karst processes according to the electromagnetic and seismic observations. 12th conference and exhibition engineering geophysics. Anapa, P. 161–164.

✉ geokarst@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-2833-8983>

**Alexeykrasikov55@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5674-1196>

12. Abdibaitov Sh. A., Khussan B., Ivadilina D. T., Lozynskiy V. H. 2022, Methods for prediction of the conditions of dip formation on the ground surface during underground development ore deposits. *Gornyy zhurnal Kazakhstana* [Mining Journal of Kazakhstan], no. 10, pp. 32–37. <https://doi.org/10.48498/minmag.2022.210.10.003>; URL: http://elib.kstu.kz/fulltext/temat/2022/Gornyy_zhurnal_32_37.pdf
13. Kadebskaya O. I., Kalinina T. A. 2014, Lithological section of Ledyanaya Mountain. Integrated use and protection of underground spaces: Collection of reports of the International scientific and practical conference. Perm, pp. 42–49.
14. Krasikov A. V., Trapeznikov D. E. 2020, New data on the lithological section of the Ledyanaya Gora massif. *Gornoe Echo* [Mountain Echo], no. 4, pp. 24–30. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.4.5>
15. Utkin M. M., Utkin M. V. 2022, Practical experience in determining the dissolution rate of karst rocks in laboratory conditions at one of the stages of the M-12 Moscow–Nizhny Novgorod–Kazan high-speed highway. *Privolzhsky nauchny zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], no. 2, pp. 90–99.

The article was received on December 09, 2024