
**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ**

УДК 551.448:624.131

**ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ТЕХНОГЕНЕЗ,
СВЯЗАННЫЙ С КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫМ
ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЕМ ФРЕАТИЧЕСКОГО ТИПА**

© 2020 г. В. П. Хоменко*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия*

**e-mail: khomenko_geol@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.11.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Рассматривается разновидность геоморфологического техногенеза, характерная для районов, где в геологическом разрезе присутствуют растворимые горные породы, перекрытые водонасыщенными несвязными дисперсными породами. В этих геологических условиях искусственный отбор воды из растворимых пород или искусственное обводнение пород, их перекрывающих, может привести к изменениям рельефа, которые выражаются в формировании одиночных, а иногда и многочисленных провалов на земной поверхности или под подошвами фундаментов. На застроенных территориях это может вызывать повреждение дорожных покрытий, деформирование и разрушение зданий и сооружений, что не раз отмечалось в нашей стране и за рубежом. В результате изучения данного феномена на лабораторных физических моделях были разработаны прогностические расчетно-теоретические решения, которые позволяют оценивать принципиальную возможность образования таких провалов и их размеры с учетом параметров сооружений, для которых они представляют угрозу.

Ключевые слова: *техногенез, карст, суффозия, провал, прогноз*

DOI: 10.31857/S0869780920020058

ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого века А.С. Девдариани [2] первым обратил внимание на техногенный рельеф, формирующийся в результате косвенного воздействия деятельности человека на протекание некоторых геологических процессов естественного происхождения, образно назвав такой рельеф и его формы возбужденными. В настоящее время Л.Л. Розанов [4] предлагает именовать процесс формирования возбужденного рельефа или его конкретных элементов техноморфоплагенностью. Если придерживаться терминологической системы, разработанной А.Л. Суздалевой и С.В. Горюновой [5], этот процесс следует называть техногенезом. При этом он может относиться к разным видам техногенеза, выделенным авторами по разным классификационным признакам: стихийному или контролируруемому, первичному или вторичному, точечному или локальному (в редких случаях к региональному), геоморфологическому или геологическому.

Техноморфоплагенность (по Л.Л. Розанову) разнообразна, многие ее виды неплохо изучены и вполне прогнозируемы, например, опускание

земной поверхности в результате извлечения из недр флюидов, просадочность лёссовых пород, техногенно активизированные овраго- и оползнеобразование. Этого, однако, нельзя сказать о феномене, именуемом карстово-суффозионным провалообразованием фреатического типа, который встречается в разных регионах нашей планеты, представляет серьезную опасность для строительства, но изучен недостаточно, а его прогнозирование сталкивается с трудностями объективного характера.

Термин “карстово-суффозионный провал фреатического типа” впервые был предложен в 2012 г. [8]. Смысл этого словосочетания заключается в том, что им обозначается такой генетический тип провалов, образование которых обусловлено суффозионным разрушением и перемещением несвязных дисперсных пород локальным нисходящим потоком грунтовых (фреатических) вод в незакальматированные карстовые полости или расширенные трещины, присутствующие в нижележащих растворимых породах. В нашей стране первое описание характерных особенностей провалов этого типа, встречающихся в Сред-

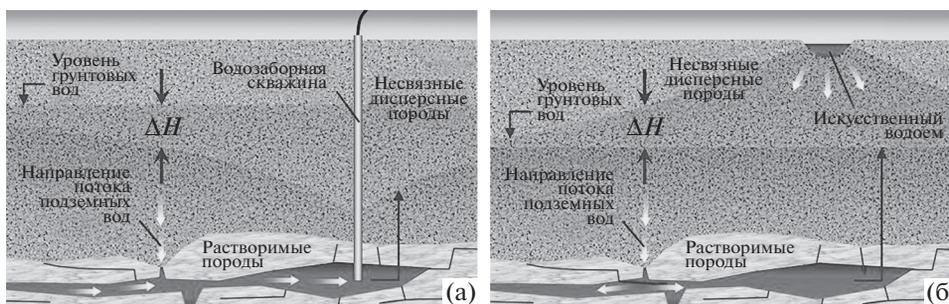


Рис. 1. Гидродинамические предпосылки карстово-суффозионного провалообразования фреатического типа, инициируемого: а – искусственным отбором воды из растворимых пород; б – техногенной инфильтрацией воды в дисперсные породы.

нем Поволжье и имеющих естественное происхождение, было дано М.С. Кавеевым [3], который предупреждал об опасности строительства зданий и сооружений вблизи таких форм рельефа.

Однако карстово-суффозионное провалообразование фреатического типа представляет еще большую опасность для строительства, если оно инициировано техногенными факторами, не говоря уже об экологическом ущербе, который оно способно нанести. Об этом, в частности, свидетельствует ситуация, сложившаяся к середине 1980-х годов на территории колледжа Берри в штате Джорджия (США), где в результате осушения известнякового карьера началось формирование провалов такого рода. Одни из них появились в рекреационной зоне кампуса на дне искусственного озера, что привело к его катастрофическому обмелению, а другие вызвали разрушение отдельных зданий колледжа [10].

ПРИРОДА ФЕНОМЕНА

Для формирования карстово-суффозионного провала фреатического типа необходимы следующие геологические условия: 1) в полностью обводненных растворимых породах должны присутствовать раскрывающиеся в их кровле карстовые полости или расширенные трещины, лишенные заполнителя; 2) растворимые породы должны быть перекрыты водонасыщенными несвязными дисперсными породами. Иными словами, должна существовать обширная область или локальный участок, где существует гидравлическая связь между поровыми надкарстовыми водами и трещинно-карстовыми водами (рис. 1). В этих условиях отток воды из растворимых пород (см. рис. 1а) и (или) поступление воды в вышележащие несвязные дисперсные породы (см. рис. 1б) вызывают появление в них нисходящей фильтрации, направленной к входу в карстовую полость или расширенную трещину, присутствующую в растворимых породах, за счет возникшего в этом месте перепада напоров (ΔH).

Механизм карстово-суффозионного провалообразования фреатического типа изучался на лабо-

раторных физических моделях [1, 9]. В ходе моделирования при прочих равных условиях постепенно увеличивалась величина ΔH . Эксперименты показали, что полное фильтрационное разрушение несвязных дисперсных пород (как разновидность суффозии [7]) начинается там, где гидравлический градиент нисходящего фильтрационного потока имеет максимальную величину – на входе в полость или трещину. Область развития суффозионного процесса ограничена поверхностью, во всех точках которой гидродинамические давления равны эффективным напряжениям. Пространство внутри этой поверхности заполнено псевдоплавнуном, который представляет собой вязкую массу, имеющую возможность перемещаться вниз в раскрытую полость или трещину под действием гравитационных и гидродинамических сил.

Вначале псевдоплавунная зона имеет форму эллипсоида (рис. 2а), высота и ширина которого постепенно увеличиваются. Логично рассматривать этот процесс как подготовку провалообразования, которая заканчивается, когда высота псевдоплавунной зоны становится равной мощности зоны насыщения несвязных дисперсных пород. С этого момента псевдоплавунная зона приобретает параболическую форму, а продолжающийся рост величины ΔH приводит к ее дальнейшему расширению и обрушению вышележащих пород. Если зона насыщения расположена достаточно глубоко, такое обрушение вначале будет иметь вид внутреннего вывала (рис. 2б) и только потом достигнет земной поверхности (рис. 2в). В противном случае провал может образоваться сразу.

В естественных условиях появление карстово-суффозионных провалов фреатического типа может быть вызвано аномальными атмосферными осадками или снижением базиса эрозии [3]. Однако рост величины ΔH , инициированный аналогично действующими техногенными факторами (инфильтрацией из искусственных водоемов, орошением, утечками из водонесущих коммуникаций, водопонижением, эксплуатацией подземных вод), отличается большей скоростью, а сама

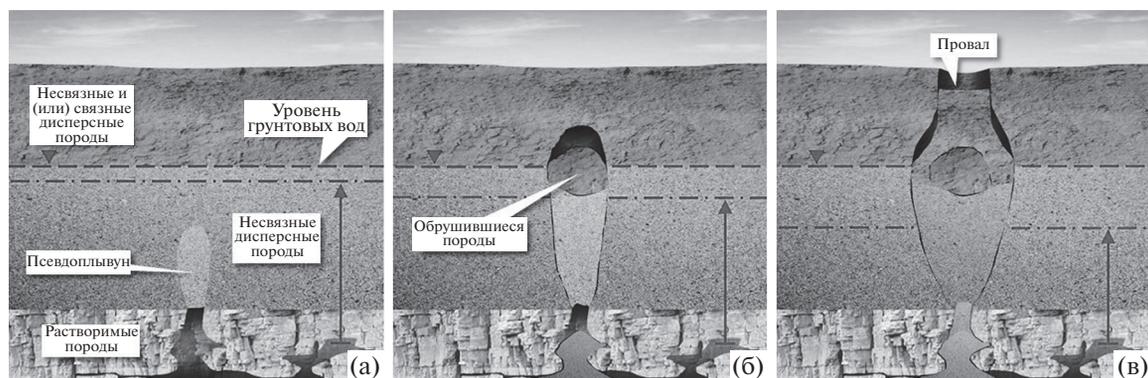


Рис. 2. Механизм карстово-суффозионного провалообразования фреатического типа: а – формирование псевдоплывунной зоны; б – обрушение дисперсных пород над псевдоплывунной зоной в виде внутреннего вывала; в – формирование провала.



Рис. 3. Провал, образовавшийся в 1996 г. в промышленной зоне г. Дзержинска Нижегородской области в результате сброса воды в зону аэрации.

эта величина может достигать больших значений. Именно поэтому карстово-суффозионное провалообразование фреатического типа, имеющее техногенное происхождение, проявляется более катастрофично, чем, если бы оно имело естественные причины. Типичный провал такого рода показан на рис. 3. Фотография была сделана приблизительно через два часа после начала разрушения дорожного покрытия. В момент фотографирования диаметр провала был равен 8 м, а его глубина достигала 2 м.

ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

Результаты экспериментального изучения рассматриваемого феномена позволили разрабо-

тать его концептуальную модель и предложить методику прогностической оценки его опасности для существующих или проектируемых сооружений на расчетно-теоретической основе. Последовательность и характер расчетных операций зависит от причины, вызывающей карстово-суффозионное провалообразование фреатического типа.

Причина – искусственный отбор воды из растворимых пород (рис. 4а)

Прогнозирование начинается с расчета критического значения величины ΔH , обеспечивающего выход псевдоплывунной зоны на верхнюю границу зоны насыщения несвязных дисперсных пород (ΔH_{kr}), по формуле [7]:

$$\Delta H_{kr} = (\sigma_y)_s / \gamma_w, \quad (1)$$

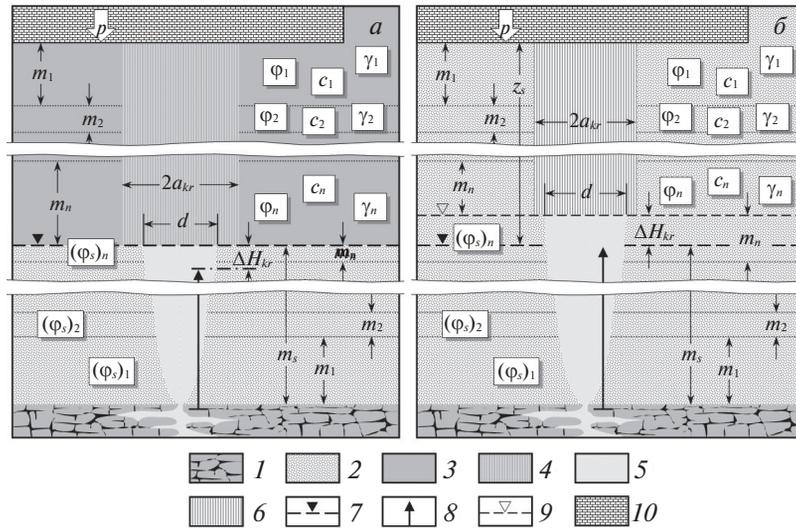


Рис. 4. Схема к прогностической оценке необходимых условий и параметров карстово-суффозионного провала образования фреатического типа, инициируемого: а – искусственным отбором воды из растворимых пород; б – техногенной инфильтрацией в дисперсные породы. Показаны ситуации, в которых провалообразование исключается ($d < 2a_{kr}$). Породы (1–3): 1 – растворимые, 2 – несвязные дисперсные, 3 – несвязные и (или) связные дисперсные; 4 – зона обрушения несвязных и (или) связных дисперсных пород; 5 – псевдопльвун; 6 – зона обрушения несвязных дисперсных пород; 7 – уровень грунтовых вод; 8 – пьезометрический напор воды; 9 – положение уровня грунтовых вод, изменившееся в результате техногенной инфильтрации; 10 – фундамент здания или сооружения. Буквенные обозначения расшифрованы в тексте.

где $(\sigma_y)_s$ – горизонтальное нормальное напряжение на верхней границе зоны насыщения, кПа; γ_w – удельный вес воды, принимаемый равным 10 кН/м³.

Затем оценивается принципиальная возможность обрушения дисперсных пород, перекрывающих зону насыщения (а, следовательно, и формирования провала). Такой возможности не существует в ситуациях, когда:

$$\Delta H_{kr} > m_s, \tag{2}$$

где m_s – мощность зоны насыщения несвязных дисперсных пород, м.

Если условие, выраженное формулой (2), не выполняется, осуществляется оценка размеров псевдопльвунной зоны при $\Delta H = \Delta H_{kr}$ по формуле [7]:

$$d = 2m_s[\gamma_w \Delta H_{kr} + 2(\sigma_y)_s] / [\gamma' m_s + 3(\sigma_z)_s] \tan \varphi_s, \tag{3}$$

где d – диаметр карстово-суффозионного провала фреатического типа, равный ширине верхней части псевдопльвунной зоны при $\Delta H = \Delta H_{kr}$, м; γ' – удельный вес несвязного грунта, взвешенного в воде, принимаемый равным 10 кН/м³; $(\sigma_z)_s$ – вертикальное нормальное напряжение на верхней границе зоны насыщения, кПа; φ_s – угол внутреннего трения водонасыщенных несвязных дисперсных пород, град., рассчитываемый как средневзвешенная величина по мощности зоны насыщения:

$$\varphi_s = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i \tan \varphi_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right), \tag{4}$$

где n – количество слоев водонасыщенных несвязных дисперсных пород; m – мощность слоя, м; φ – угол внутреннего трения слагающих его пород, град.; i – порядковый номер слоя, начиная от кровли растворимых пород; i в нижнем индексе – параметр i -го слоя.

Образование карстово-суффозионного провала фреатического типа с диаметром d под фундаментом здания или сооружения возможно только при соблюдении условия [7]:

$$d \geq 2a_{kr}, \tag{5}$$

где $2a_{kr}$ – критическая ширина верхней части псевдопльвунной зоны, при которой под фундаментом происходит обрушение вышележащих дисперсных пород, принимающее вид провала, м. Эта величина рассчитывается на основе, так называемой круглоцилиндрической геомеханической модели по формулам [6]:

$$2a_{kr} = 2 \left[\sum_{i=1}^n (\sigma'_y + \sigma''_y) m_i \tan \varphi_i + 2 \sum_{i=1}^n m_i c_i \right], \tag{6}$$

$$\sigma'_y = \left(p \alpha_{i-1} + \sum_{i=1}^n \gamma_{i-1} m_{i-1} \right) \xi_{i-1}, \tag{7}$$

$$\sigma''_y = \left(p \alpha_i + \sum_{i=1}^n \gamma_i m_i \right) \xi_i, \tag{8}$$

где n – количество слоев дисперсных пород, перекрывающих зону насыщения до подошвы фундамента; i – порядковый номер слоя, начиная от подошвы фундамента, i и $i - 1$ в нижнем индексе – соответственно параметр i -го слоя и слоя, залегающего над i -м слоем; σ_y' – горизонтальное нормальное напряжение в кровле слоя, кПа; σ_y'' – то же, в его подошве, кПа; m – мощность слоя ($m_0 = 0$), м; φ – угол внутреннего трения слагающих его пород, град.; c – их удельное сцепление, кПа; γ – их удельный вес, кН/м³; p – давление под подошвой фундамента, кПа; α – коэффициент, значения которого принимаются по таблице 5.8 СП 22.13330.2011¹ ($\alpha_0 = 1$); ξ – коэффициент бокового давления, рассчитываемый по формуле:

$$\xi = \tan^2(45^\circ - \varphi/2). \quad (9)$$

В случае выполнения условия, выраженного формулой (5), делается вывод о возможности образования под подошвой фундамента здания или сооружения карстово-суффозионного провала фреатического типа, имеющего диаметр d .

Причина – техногенная инфильтрация воды в дисперсные породы (рис. 4б)

Вначале осуществляется проверка условия, выражаемого формулой:

$$p\xi^* > \gamma_w z_s, \quad (10)$$

где ξ^* – коэффициент бокового давления пород, залегающих непосредственно под подошвой фундамента; z_s – глубина уровня грунтовых вод от подошвы фундамента, м.

Провалообразование считается невозможным, если это условие выполняется. В противном случае определяется величина ΔH_{kr} , что целесообразно делать графически так, как это показано на рис. 5. Ширина псевдоплывинной зоны при $\Delta H = \Delta H_{kr}$ оценивается с использованием видоизмененного варианта формулы (3), принимающей вид:

$$d = 2(m_s + \Delta H_{kr}) \times [\gamma_w \Delta H_{kr} + 2(\sigma_y)_s] / [\gamma(m_s + \Delta H_{kr}) + 3(\sigma_z)_s] \tan \varphi_s. \quad (11)$$

При этом параметр φ_s также рассчитывается как средневзвешенная величина по мощности зоны насыщения, однако в связи с ожидаемым подъемом уровня грунтовых вод эта мощность принимается равной не m_s , а $m_s + \Delta H_{kr}$. Для этого нового уровня рассчитываются также и величины $(\sigma_y)_s$ и $(\sigma_z)_s$.

Затем с помощью формул (6)–(9) определяется величина $2a_{kr}$, также с учетом более высокого

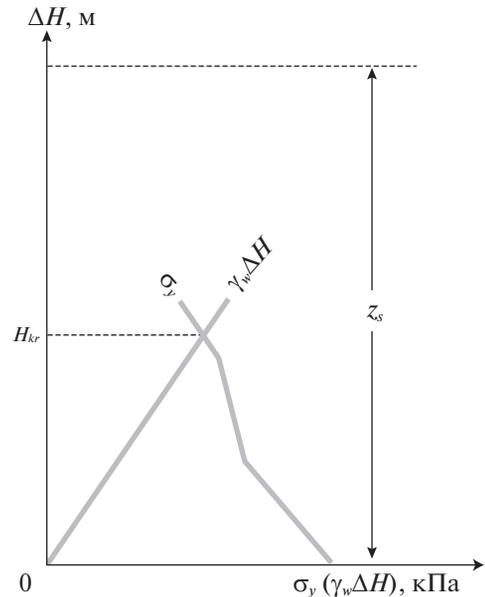


Рис. 5. Схема, иллюстрирующая принцип графического определения величины ΔH_{kr} для оценки возможности образования карстово-суффозионного провала фреатического типа в условиях техногенной инфильтрации воды в дисперсные породы.

положения уровня грунтовых вод, и осуществляется проверка выполнения условия, выраженного формулой (5). Если оно выполняется, следует ожидать образования карстово-суффозионного провала фреатического типа с диаметром d , а если нет – то это событие не сможет реализоваться.

ВЫВОДЫ

1. Геоморфологический техногенез, выражающийся в образовании карстово-суффозионных провалов фреатического типа, характерен для районов распространения растворимых пород, перекрытых водонасыщенными несвязными дисперсными породами. В мировой практике известны случаи, когда появление таких провалов приводило к значительному материальному, социальному и экологическому ущербу.

2. Для образования карстово-суффозионных провалов фреатического типа достаточно присутствия в растворимых породах даже не полостей, а расширенных трещин. Причинами этих феноменов чаще всего являются такие техногенные воздействия на подземную гидросферу, как водопонижение, осушение, эксплуатация трещинно-карстовых вод, создание искусственных водоемов, орошение почв, утечки из водонесущих коммуникаций.

3. Экспериментальное изучение карстово-суффозионного провалообразования фреатического типа показало, что этот процесс в достаточной мере детерминирован и имеет в своем развитии определенные ограничения. Это позволяет

¹ Свод правил СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*/ Минрегион России. М.: ОАО "ЦПП", 2011. 162 с. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293811/4293811026.htm>

прогностически оценивать на расчетно-теоретической основе возможность появления данной генетической разновидности карстовых провалов под фундаментами зданий и сооружений и их ожидаемые диаметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В.Л., Хоменко В.П. Прогноз развития карстово-суффозионных процессов, вызванных утечками из водонесущих сетей // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве. М.: Наука, 1990. С. 94–102.
2. Девдариани А.С. Антропогенные формы рельефа // Вопросы географии. 1954. Сб. 36: Геоморфология. С. 117–120.
3. Кавеев М.С. Карстово-суффозионные явления в левобережной части долины Волги в пределах Татарской АССР // Изв. ВГО. 1956. Т. 88. Вып. 5. С. 460–466.
4. Розанов Л.Л. Объектно-предметная сущность прикладной геотехноморфологии // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2014. № 3. С. 64–74.
5. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: ООО ИД ЭНЕРГИЯ, 2014. 456 с.
6. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
7. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: GEOS, 2003. 2016 с.
8. Хоменко В.П. Закономерности карстового провалообразования // Семинар по проблемам инженерного карстования. Дзержинск, 4–5 октября 2012 г. / Лекции. Тезисы лекций. Дзержинск: СРО НП “ИГИС”, 2012. С. 103–105.
9. Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.
10. Jovanelly T.J. Sinkholes and a disappearing lake: Victory Lake case study // Journal of Cave and Karst Studies. 2014. V. 76. № 3. P. 217–229.

GEOMORPHOLOGICAL TECHNOGENESIS RELATED TO PHREATIC PIPING-COLLAPSE SINKHOLE FORMATION

V. P. Khomenko[#]

National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia
[#]e-mail: khomenko_geol@mail.ru

A kind of geomorphological technogenesis is considered, which is typical for areas where soluble rocks are covered by saturated noncoherent soils. In this geological setting, the man-made withdrawal of water from soluble deposits or technogenous watering of cover soils can lead to such changes in relief as the formation of single (and sometimes numerous) collapse sinkholes on the Earth surface or under foundations. In built-up areas, this can cause damage to road surfaces, deformation, and destruction of buildings and structures, which has been repeatedly noted in our country and abroad. The predictive theoretical decisions based on the results of laboratory modeling of this phenomenon have been proposed. They allow estimating the possibility of the collapse sinkhole's formation and its size, taking into consideration parameters of a structure situated over it.

Keywords: *technogenesis, karst, piping, collapse sinkhole, prediction*

REFERENCES

1. Belyaev, V.L., Khomenko, V.P. *Prognoz razvitiya karstovo-suffozionnykh protsessov, vyzvannykh utechkami iz vodonesushchikh setei* [The prediction of soil piping caused by leakage from water pipelines in karst areas]. *Prognoz izmenenii inzhenerno-geologicheskikh uslovii pri stroitel'stve* [The prediction of a change in engineering-geological conditions during construction]. Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 94–102. (in Russian)
2. Devdariani, A.S. *Antropogennyye formy rel'efa* [Anthropogenic landforms]. *Voprosy geografii, sbornik 36: Geomorfologiya*, 1954, pp. 117–120. (in Russian)
3. Kaveev, M.S. *Karstovo-suffozionnye yavleniya v levoberezhnoi chasti doliny Volgi v predelakh Tatarskoi ASSR* [Karst-piping phenomena in the left-bank part of Volga valley in Tartar Republic]. *Izvestiya VGO*, 1956, vol. 88, issue 5, pp. 460–466. (in Russian)
4. Rozanov, L.L. *Ob'ektno-predmetnaya sushchnost' prikladnoi geotekhnomorfologii* [Subject matter of applied geotechnomorphology]. *Vestnik MGOU, seriya: Estestvennye nauki*, 2014, no. 3, pp. 64–74. (in Russian)
5. Suzdaleva, A.L., Goryunova, S.V. *Tekhnogenez i degradatsiya poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov* [Technogenesis and degradation of surface water bodies]. Moscow, ID Energiya Publ., 2014, 456 p. (in Russian)
6. Tolmachev, V.V., Troitskii, G.M., Khomenko, V.P. *Inzhenerno-stroitel'noe osvoenie zakarstovannykh territorii* [Engineering and construction in karst terrains]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1986, 176 p. (in Russian)
7. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognost suffozionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffozion]. Moscow, GEOS, 2003, 216 p. (in Russian)
8. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti karstovogo provalobrazovaniya* [Regularities of collapse sinkholes formation]. *Seminar po problemam inzhenernogo karstovedeniya. Dzerzhinsk, 4-5 oktyabrya 2012 g.* [Workshop on engineering karstology problems. Dzerzhinsk, 4–5 October 2012]. Dzerzhinsk, 2012, pp. 103–105. (in Russian)
9. Khomenko, V.P. *Karstovo-suffozionnye protsessy i ikh prognost* [Karst piping and its prediction]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 97 p. (in Russian)
10. Jovanelly, T.J. Sinkholes and a disappearing lake: Victory Lake case study. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2014, vol. 76, no. 3, pp. 217–229.