



## УДК 624.131.3

Д. И. КИСЛИЦЫН, канд. техн. наук, зав. кафедрой информационных систем и технологий; П. М. БОКОВАЯ, студент; И. С. ЖИЛЬЦОВ, студент

### МЕТОД РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ КАРСТОВОГО ПРОВАЛА ПОД СТРОИТЕЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 433-19-20;  
эл. почта: kislitsyn@nngasu.ru

*Ключевые слова:* карстовая опасность, раннее обнаружение карстового провала, метод триангуляции.

---

*Приведено описание метода, позволяющего по малым вертикальным перемещениям в основании элементов несущих конструкций определить расположение и площадь карстового провала даже на этапе, когда провал небольшого размера еще не привел к обрушению строительной конструкции, под которой он находится. Показаны результаты численных экспериментов, подтверждающие результативность разработанного метода.*

---

Карстовый процесс является одним из опаснейших геологических процессов как по степени опасности и внезапности его проявления в виде провалов и оседаний земной поверхности, так и по масштабам и степени угрозы для урбанизированных территорий [1]. В связи с этим исследования карста для разных сторон практической деятельности человеческого общества и изучения обратной связи при возрастающем прогрессе техносферы становятся актуальными задачами современной инженерной геологии. Поэтому следует обратить особое внимание на развитие систем мониторинга состояния строительных объектов, позволяющих своевременно предсказывать возможность проявлений карстовых провалов, так как обрушение возможно только при достижении карстовой полостью предельных размеров [2]. Раннее обнаружение этих явлений в настоящее время является актуальной задачей, т. к. при выявлении ранних признаков могут быть обнаружены причины, которые могут приостановить развитие карстового процесса.

Одним из наиболее предпочтительных способов определения карстовых процессов является использование автоматизированных систем мониторинга негативных процессов. Современные системы автоматизированного проектирования должны обеспечивать в режиме реального времени измерение напряженно-деформированного состояния объектов с их последующей математической обработкой, представляя обработанные данные в понятном для пользователя виде, а также прогнозировать дальнейшее поведение наблюдаемого объекта [3].

Ранее было обнаружено влияние расположения и размера карстового провала на вертикальные перемещения фундаментной плиты [4].

Ниже описан метод, позволяющий определить примерное местоположение и размер карстового провала даже на этапе, когда провал небольшого размера и еще не привел к обрушению строительной конструкции, под которой он находится.

Пусть  $\Delta z = |z_k - z_0|$  – разница вертикальных перемещений в основании элементов несущих конструкций рассматриваемого строительного объекта на

заданном грунте (с карстом и без), где  $z_0$  – вертикальное перемещение в точке грунта без карста от собственного веса здания,  $z_k$  – вертикальное перемещение в точке грунта с карстом от собственного веса здания. Тогда разница вертикальных перемещений  $\Delta z$  в точке  $K$  будет зависеть от расстояния  $L$  до центра карстовой воронки размером  $R$ , параметров грунта  $G$  и параметров строительного объекта  $O$ , т. е.  $\Delta z = f(L, R, G, O)$ . При этом для одного и того же строительного объекта  $O$  функцию  $f$  можно упростить до трех параметров, т. е.  $f(L, R, G)$ . Функцию  $f$  можно дискретно определить, моделируя карстовые провалы разного размера  $R$  на разном расстоянии от точки  $K$  на заданном грунте  $G$  для конструкции  $O$ . Полученный на основе такого моделирования набор данных будем называть матрицей перемещений  $M$ . Величину  $z_0$  можно определить либо по датчику вертикальных перемещений заранее до образования карста, либо используя КЭ-модель здания; величину  $z_k$  можно определить по датчику вертикальных перемещений.

Далее по полученным с датчиков, расположенных в основании несущих конструкций (например, на колоннах, далее «опорные точки») вертикальным перемещениям, будем последовательно перебирать возможные размеры карстового провала, учтенные в матрице перемещений, и для каждого варианта размера будем для каждой опорной точки по матрице перемещений определять расстояние от этой точки до предполагаемого центра провала. Используя метод триангуляции, по полученным расстояниям будем проверять существует ли такая точка, где пересекаются радиальные расстояния опорных точек (рис. 1). Точка пересечения окружностей и является центром карстового провала, а размер провала будет равен рассматриваемому варианту размера.

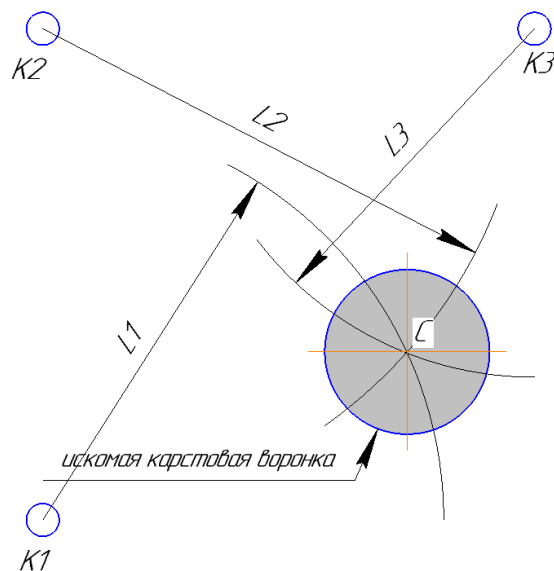


Рис. 1. Определение центра карстовой воронки:  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  – колонны, с которых снимаются данные вертикальных перемещений;  $C$  – центр искомой карстовой воронки;  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  – соответственно расстояния от колонн  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  до центра  $C$  воронки

Пример схемы моделирования карстовых провалов заданного размера на однородном грунте (постоянный коэффициент постели грунта для всей рассматриваемой строительной площадки) показан на рис. 2. Размеры воронок  $V$

одинаковые. Воронки моделируем не все сразу, а последовательно. В этом случае для каждой точки  $K$  мы последовательно от каждой воронки  $V$  получим свою пару значений:  $\Delta z$  и  $L$ .

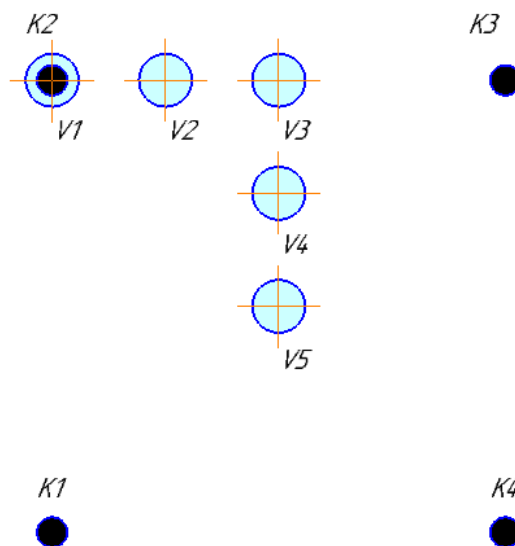


Рис. 2. Пример расположения моделируемых воронок  $V$

Выполнив для рассматриваемого на рис. 2 случая расчеты шести КЭ-моделей (одна модель без карстовой воронки и пять моделей с разным расположением воронки диаметром 2,4 м) мы получим 12 различных пар значений  $\Delta z$  и  $L$  (рис. 3).

Сведем их в таблицу (табл. 1).

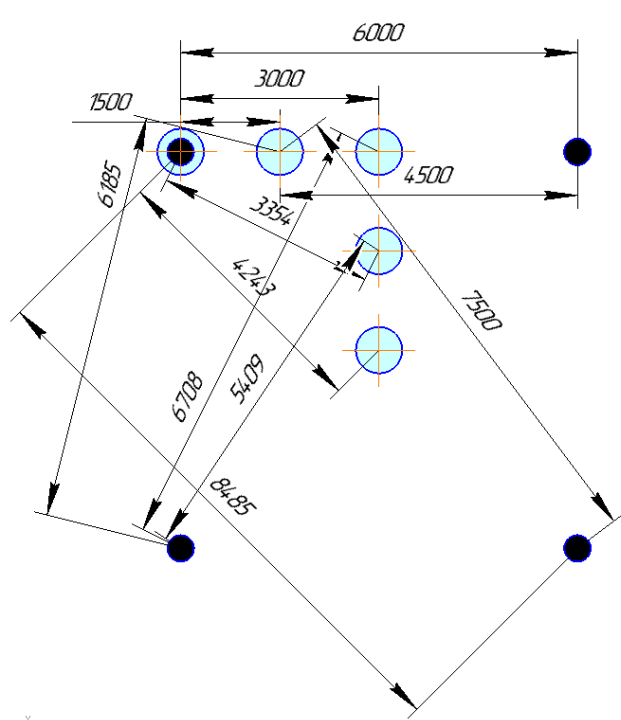


Рис. 3. Нахождение величин  $\Delta z$  и  $L$



Таблица 1

Зависимость между величинами  $\Delta z$  и  $L$ 

$\Delta z$ , мм	$L$ , м
0.010	8.485
0.024	7.500
0.034	6.708
0.054	6.185
0.066	6.000
0.074	5.409
0.114	4.500
0.155	4.243
0.184	3.354
0.214	3.000
0.334	1.500
0.427	0.000

По полученным значениям строим график зависимости  $L(\Delta z)$  (рис. 4).

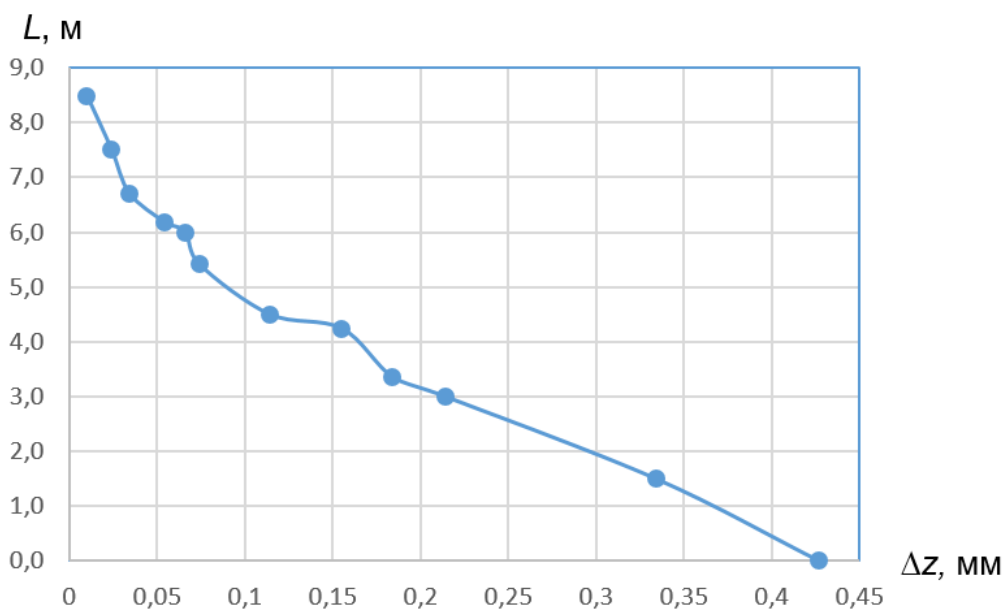


Рис. 4. График искомой зависимости

По построенному по точкам на рис. 4 графику с помощью средств *MS Excel* определяем аппроксимирующую кривую. Аппроксимирующая кривая должна максимально точно повторять график. Для данного случая в качестве аппроксимирующей кривой выбираем полином четвертой степени с величиной достоверной аппроксимации равной 0,9944 (рис. 5).

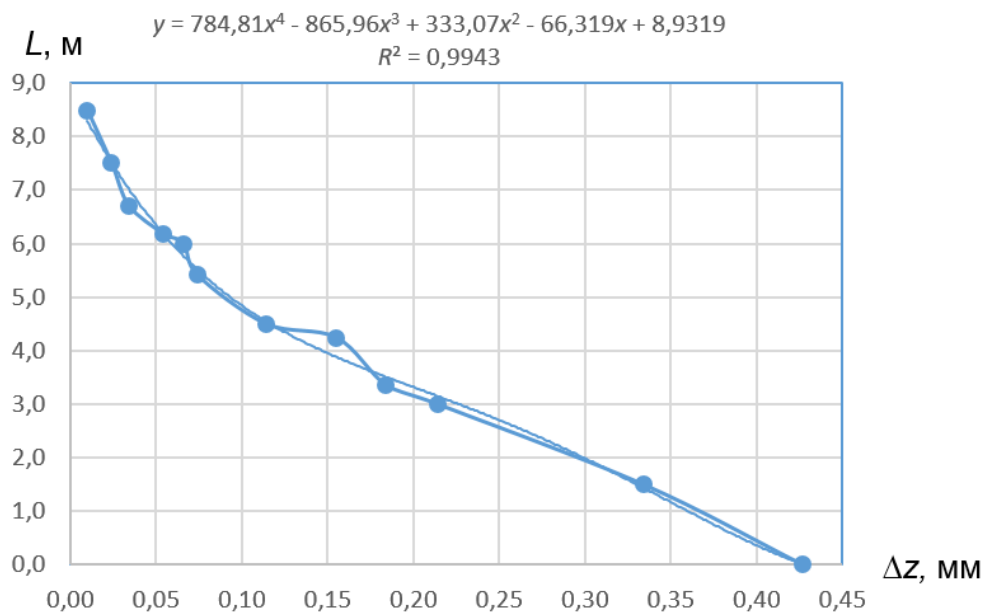


Рис. 5. Построение аппроксимирующей кривой

Получив аппроксимирующую кривую, можно определить центр искомой карстовой воронки. В качестве примера в табл. 2 показаны перемещения  $\Delta z$  и расстояния  $L$  для колонн  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $K4$ .

Таблица 2

**Перемещения и расстояния для различных колонн**

Колонна	$\Delta z$ , мм	$L$ , м
$K1$	0.254	2.646007
$K4$	0.104	4.76109
$K3$	0.054	6.195651
$K2$	0.114	4.555155

По данным табл. 2 пунктирной линией построим карстовую воронку диаметром 2,4 м (рис. 6). Здесь же сплошной линией построим воронку по данным из КЭ-модели.

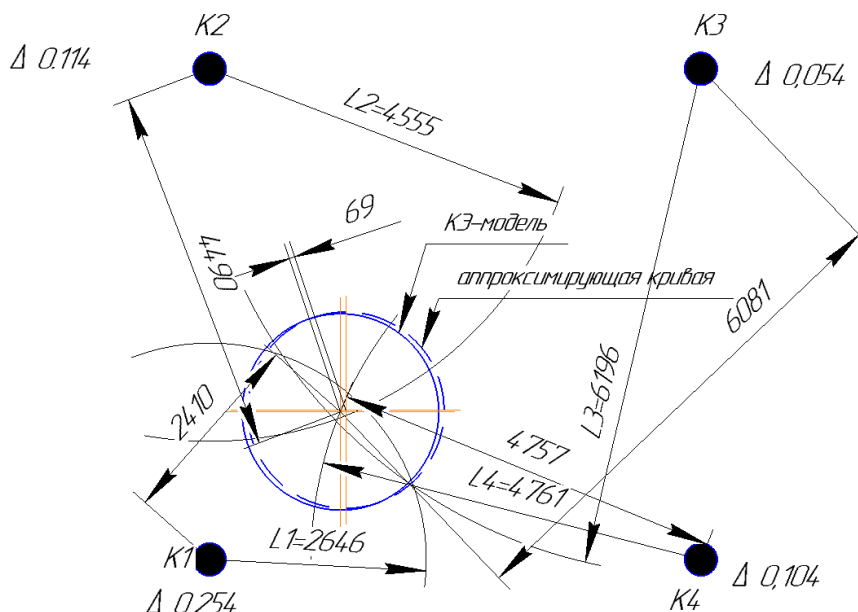


Рис. 6. Нахождение искомой карстовой воронки

Из рис. 6 можно видеть, что воронки почти наложились друг на друга. Расхождение равно 69 мм, что для площадки 6×6 м составляет порядка 1 %.

Результаты проведенного на данном этапе численного эксперимента подтвердили корректность предложенного метода. Конечно, в рассматриваемом примере размер воронки был фиксирован. В реальности же ее размер не известен, поэтому для построения матрицы перемещений необходимо также смоделировать воронки разного размера, что и будет выполнено в дальнейших исследованиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Некоторые данные о существовании в зарубежных странах закарстованных территорий / А. Н. Супрун, Д. И. Кислицын, А. А. Егорова, А. С. Мигунова, А. А. Коен, Д. А. Максимов // Труды научной конференции 17-го Российского архитектурно-строительного форума / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – С. 11–14.

2. Мельник, В. В. Обоснование геомеханических факторов для диагностики опасности карстопроявлений при недропользовании : специальность 25.00.20 : автореферат диссертации кандидата технических наук / Мельник Виталий Вячеславович. – Екатеринбург, 2010. – 21 с.

3. Хромых, В. Е. Компьютерное моделирование катастрофических карстовых провалов в основании строительных объектов / В. Е. Хромых, А. Н. Супрун, Д. И. Кислицын // Труды научной конференции 17-го Российского архитектурно-строительного форума / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – С. 14–16.

4. Супрун, А. Н. Модернизация современных IT-систем мониторинга технических состояний уникальных зданий и сооружений для раннего обнаружения негативных процессов / А. Н. Супрун, Д. И. Кислицын, В. Е. Хромых // Труды научно-практической конференции в рамках 16-го Российского архитектурно-строительного форума / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – С. 31–36.



**KISLITSYN Dmitriy Igorevich, candidate of technical sciences, holder of the chair of information systems and technologies; BOKOVAYA Polina Maksimovna, student; ZHILTSOV Ivan Sergeevich, student**

## **METHOD FOR EARLY DETECTION OF A CARST SINK UNDER A CONSTRUCTION SITE**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Ijinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 433-19-20;  
e-mail: kislitsyn@nngasu.ru

*Key words:* karst hazard, early detection of a karst sinkhole, triangulation method.

---

*The article presents the description of a method, which allows to determine the location and area of a karst sinkhole by small vertical displacements at the base of the elements of the supporting structures, even at the stage when the sinkhole is small and has not yet led to the collapse of the building structure under which it is located. The results of numerical experiments are shown, confirming the effectiveness of the developed method.*

---

### REFERENCES

1. Suprun A. N., Kislitsyn D. I., Egorova A. A., Migunova A. S., Koen A. A., Maksimov D. A. Some data on the existence of karst territories in foreign countries / Trudy nauchnoy konferentsii 17-go Rossiyskogo arkhitekturno-stroitel'nogo foruma [Proceedings of the Scientific Conference of the 17th Russian Architecture and Construction Forum] / Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2019. – P. 11–14.
2. Melnik V. V. Obosnovanie geomekhanicheskikh faktorov dlya diagnostiki opasnosti karstoproyavleniy pri nedropolzovanii [Substantiation of geomechanical factors for diagnosing the danger of karst manifestations during subsoil use]: spetsialnost 25.00.20 : avtoref. diss. cand. tekhn. nauk. – Ekaterinburg, 2010. – 21 p.
3. Khromykh V. E., Suprun A. N., Kislitsyn D. I. Komputernoe modelirovanie katastroficheskikh karstovyykh provalov v osnovanii stroitelnykh obektov [Computer modeling of catastrophic karst sinkholes at the base of construction objects] / Trudy nauchnoy konferentsii 17-go Rossiyskogo arkhitekturno-stroitel'nogo foruma [Proceedings of the Scientific Conference of the 17th Russian Architecture and Construction Forum] / Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2019. – P. 14–16.
4. Suprun A. N., Kislitsyn D. I., Khromykh V. E. Modernizatsiya sovremennykh IT-sistem monitoringa tekhnicheskikh sostoyaniy unikalnykh zdaniy i sooruzheniy dlya rannego obnaruzheniya negativnykh protsessov [Modernization of modern IT systems for monitoring technical conditions of unique buildings and structures for early detection of negative processes] / Trudy nauchnoy konferentsii 16-go Rossiyskogo arkhitekturno-stroitel'nogo foruma [Proceedings of the scientific and practical conference within the framework of the 16th Russian Architecture and Construction Forum] / Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2018. – P. 31–36.

© Д. И. Кислицын, П. М. Боковая, И. С. Жильцов, 2023

Получено: 20.04.2023 г.