



УДК 624.131:551.435.8

Д. И. КИСЛИЦЫН, канд. техн. наук, зав. кафедрой информационных систем и технологий<sup>1</sup>; В. Е. ХРОМЫХ, аспирант<sup>1</sup>, ведущий разработчик категории 1<sup>2</sup>

**ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МЕТОДУ РАННЕГО  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ДИАМЕТРА КАРСТОВОГО  
ПРОВАЛА В ОСНОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА ПО  
ИМЕЮЩИМСЯ МАЛЫМ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ НА  
ОДНОРОДНОМ ГРУНТЕ**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 433-19-20;

e-mail: kislitsyn@nngasu.ru

<sup>2</sup>ООО «РуПост»

Россия, 117105, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 26, этаж Т, офис 40.

Тел.: (495) 369-48-16; e-mail: info@rupost.ru

*Ключевые слова:* карстовая опасность, раннее обнаружение карстового провала, метод триангуляции, программное средство «Карст».

---

*Приводится описание численных экспериментов на основе метода раннего обнаружения карстового провала под строительным объектом для определения местоположения и размера провала для случая с однородным грунтом, а также пример работы с программным средством «Карст».*

---

В [1] был описан метод, позволяющий по малым вертикальным перемещениям в основании элементов несущих конструкций определить расположение и размер карстового провала даже на этапе, когда провал небольшого размера и еще не привел к обрушению строительной конструкции, под которой он находится; также были представлены результаты численного моделирования случая с разным расположением карстового провала одного заранее известного размера на однородном грунте (постоянный коэффициент постели грунта для всей рассматриваемой строительной площадки).

Рассмотрим применение описанного метода для поиска местоположения и размера провала для случая, когда его размер заранее не известен. Для определения местоположения и размера карстового провала необходимо построить матрицу перемещений  $M$ . Матрица описывает поведение рассматриваемой строительной конструкции на заданном грунте  $G$  при различных вариантах расположения и площади карстового провала (используется КЭ-моделирование).

Матрица представлена дискретным набором функций  $f(L, R, G)$ , описывающих  $\Delta z$ , где  $\Delta z = |z_k - z_0|$  – разница вертикальных перемещений в опорных точках  $K$  в основании элементов несущих конструкций рассматриваемого строительного объекта на заданном грунте с карстом ( $zk$ ) и без карста ( $z0$ );  $R$  – размер (площадь) карстового провала;  $L$  – расстояние от точки  $K$  до центра провала.



Далее по полученным с датчиков, расположенных в точках  $K$ , вертикальным перемещениям будем последовательно перебирать возможные площади карстового провала, учтенные в матрице перемещений, и для каждого варианта площади для каждой опорной точки по матрице перемещений будем 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. Точка пересечения окружностей и является центром карстового провала, а площадь провала будет равна рассматриваемому варианту площади. Так как площадь провала может быть произвольной, то учесть все возможные значения площади при построении матрицы перемещений представляется крайне затруднительным. Поэтому при построении матрицы площади будут браться с определенным шагом.

Рассмотрим некоторую модель строительной конструкции (рис. 1), состоящую из колонн с шагом 6 м, балок и плит, нагруженную собственным весом.

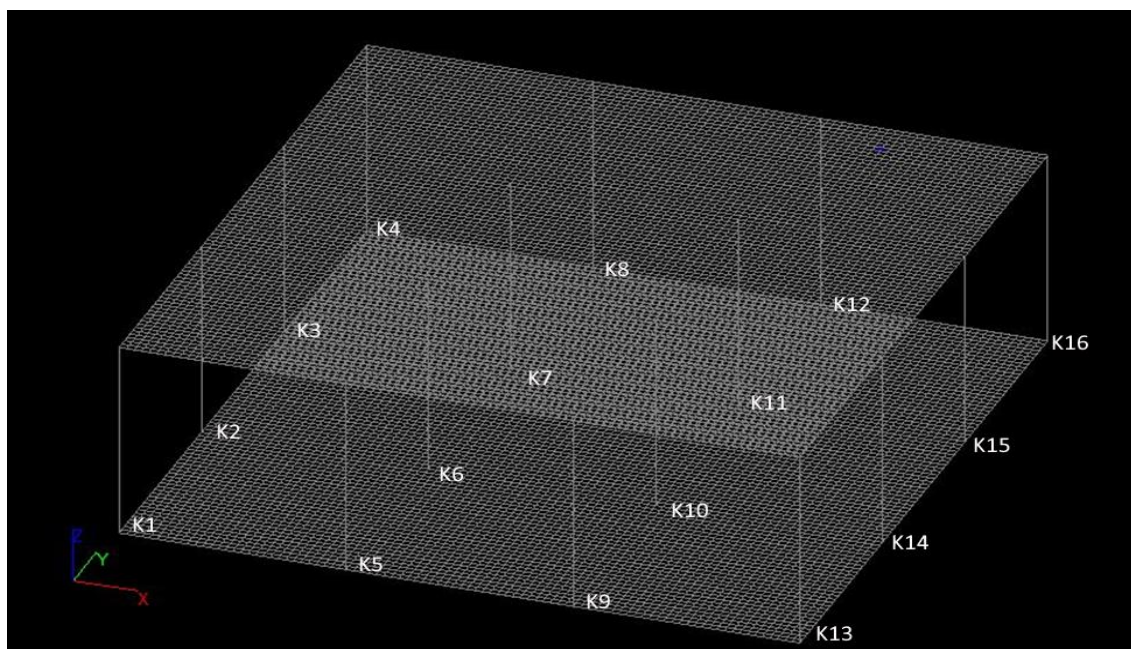


Рис. 1. Модель строительной конструкции

Конструкция находится на некотором грунте, состоящем из песка, глины и супеси. Модель строительной конструкции и грунта под ней выполнена в вычислительном комплексе *SCAD* [2].

Для формирования матрицы перемещений рассмотрим 23 варианта площади карстового провала (от 0 до  $77,44 \text{ м}^2$ ). С целью упрощения провалы будем моделировать квадратной формы со стороной от 0 (отсутствие провала) до 8,8 м посредством назначения КЭ-пластинам в зоне провала коэффициента постели, равного нулю (рис. 2). Рассматривать будем перемещения в узлах, находящихся на расстоянии от 0 до 9 м от центра провала.

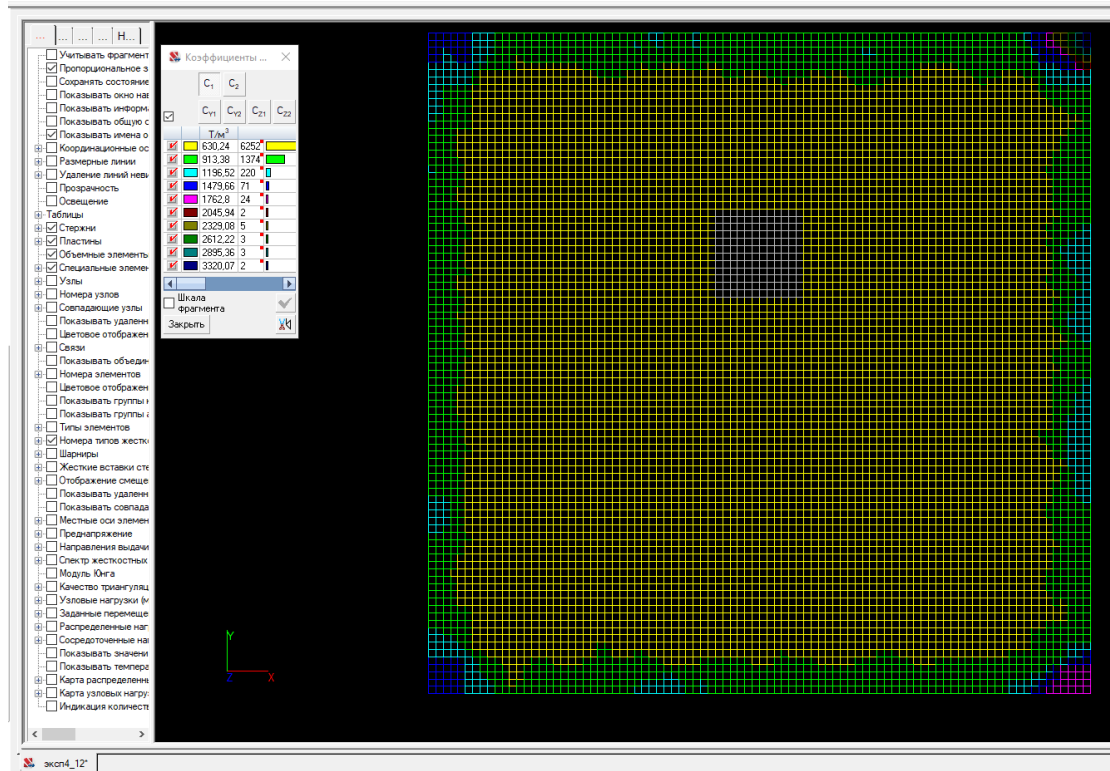
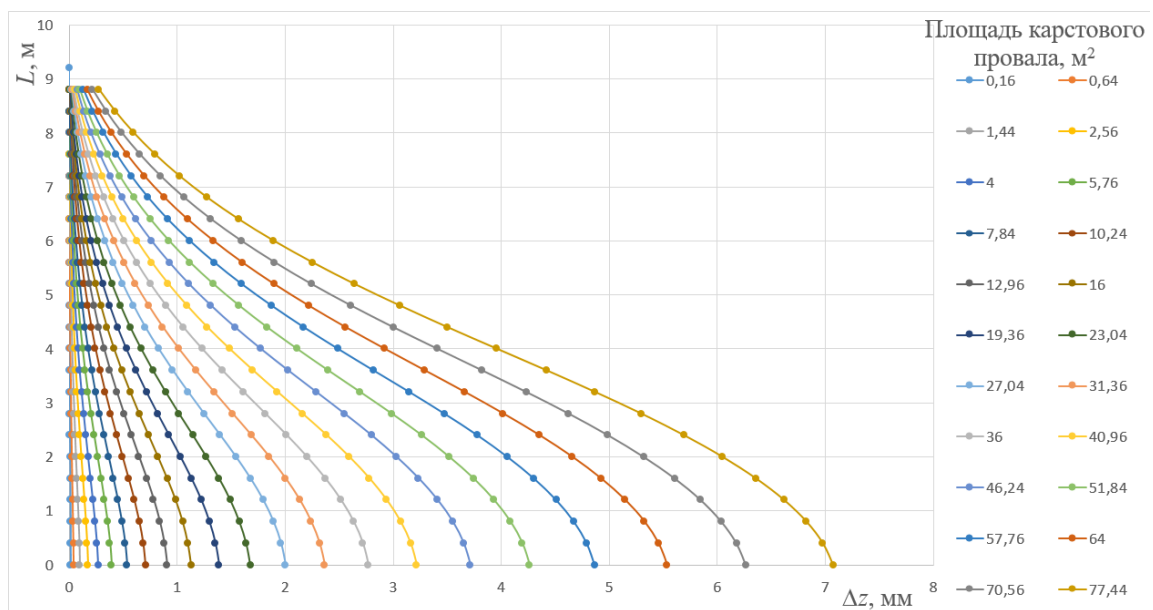


Рис. 2. Моделирование карстового провала через коэффициент постели

Выполнив расчеты по всем моделям, построим графики зависимости  $L(\Delta z)$  для разных площадей карстового провала (рис. 3). По оси абсцисс отложен модуль разности перемещений  $z_k$  и  $z_0$ , по оси ординат – расстояние от узла  $K$  до центра карстового провала.

Допустим, что на рассматриваемом объекте карстовый провал имеет размер  $27 \text{ м}^2$ , местоположение показано на рис. 4.


 Рис. 3. Графики зависимости  $L(\Delta z)$  для разных площадей карстового провала

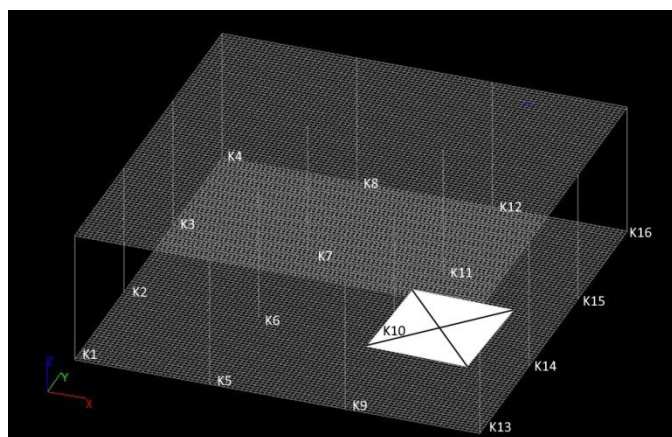


Рис. 4. Моделирование карстового провала

Для определения площади и расположения карстового провала выполним следующее:

1. Выберем несколько опорных точек (К6, К7, К9, К10, К11, К13, К14, К15), в которых нам заведомо известны вертикальные перемещения до образования карстового провала (данные сняты после возведения объекта) и перемещения на момент образования провала. Перемещения в указанных опорных точках приведены в таблице. Чем больше точек, тем выше точность определения местоположения и размера провала.

2. Будем последовательно перебирать возможные площади карстового провала, рассмотренные выше. Для каждого варианта площади проделаем следующие действия:

1) последовательно перебираем все опорные точки (п. 1). Используя данные графиков на рис. 3, для каждой опорной точки К определяем  $L_k$  – расстояние от  $k$ -й точки до центра карста;

2) от каждой опорной точки отложим на схеме окружность с радиусом, равным  $L_k$ .

В том случае, когда все построенные окружности для выбранной площади пересекутся в одной точке, то это точка и будет являться центром карстового провала данной площади.

Опорная точка	Перемещение в опорной точке до образования карста ( $z_0$ ), мм	Перемещение в опорной точке после образования карста ( $z_k$ ), мм	Разница вертикальных перемещений в опорных точках ( $\Delta z$ ), мм
К6	-2,82	-2,93	0,11
К7	-2,83	-2,89	0,06
К9	-2,68	-2,54	0,14
К10	-2,83	-4,16	1,33
К11	-2,83	-3,68	0,85
К13	-2,43	-2,06	0,37
К14	-2,56	-3,39	0,83
К15	-2,56	-3,04	0,48

В ходе решения данной задачи необходимо построить 22 окружности разного радиуса для каждой из 8 выбранных опорных точек. Ввиду трудоемкости задачи было решено автоматизировать этот процесс. Аспирантом кафедры информационных систем и технологий ННГАСУ Хромых В. Е. было разработано программное средство «Карст», позволяющее выполнить необходимые построения для визуального определения расположения и площади карстового провала. Входными данными для приложения являются:

1) CSV-файл, содержащий матрицу перемещений, описанную графиками на рис. 3;

2) XML-файл, содержащий информацию о перемещениях в опорных точках. Файл создается непосредственно в приложении «Карст».

Далее, перебирая все варианты площадей, прописанные в CSV-файле, необходимо найти схему, на которой окружности пересекаются в одной точке, и посмотреть какой площади она соответствует. Так как матрица перемещений содержит дискретный набор площадей, то скорее всего окружности не будут идеально пересекаться в одной точке, и необходимо визуально найти схему, где такая точка локализуется лучше всего. В рассматриваемом примере искомая площадь карстового провала равна  $27,04 \text{ м}^2$ . Расположение ее центра показано на рис. 5 и соответствует фактическому размещению, показанному на рис. 4.

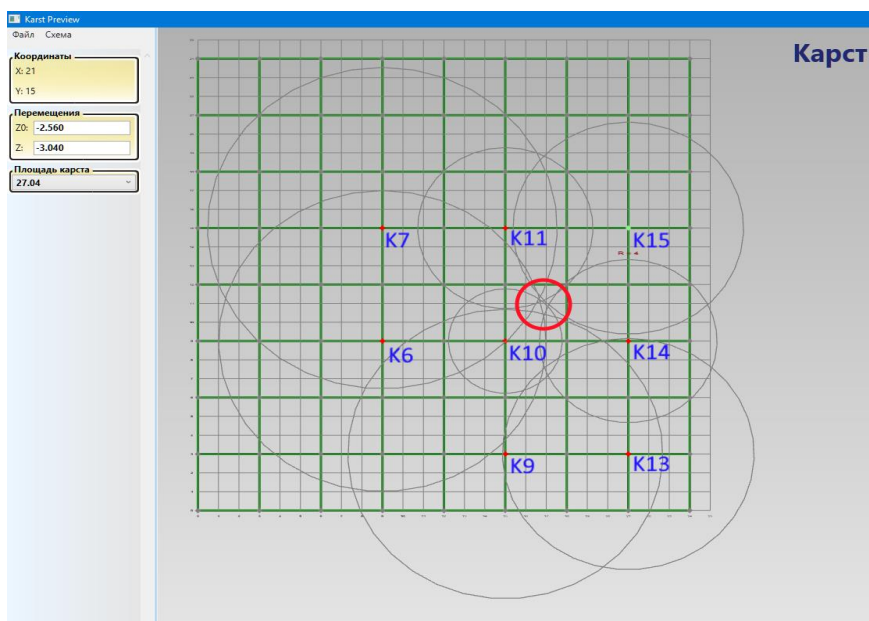


Рис. 5. Пересечение окружностей для кривой, соответствующей площади карстового провала, равной  $27,04 \text{ м}^2$

Если рассмотреть варианты для других площадей, например,  $21,16 \text{ м}^2$  или  $77,44 \text{ м}^2$  (рис. 6, 7), то можно заметить, что визуально определить единый центр пересечения окружностей не представляется возможным.

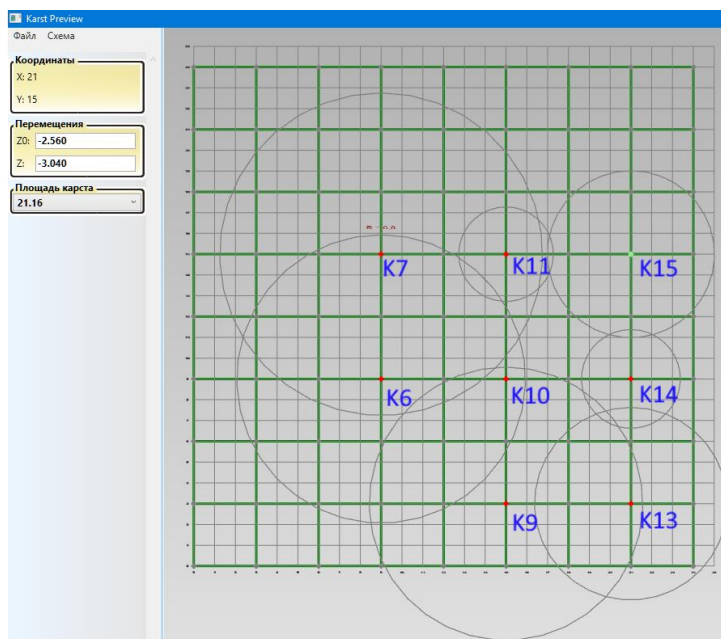


Рис. 6. Пересечение окружностей для кривой, соответствующей площади карстового провала, равной  $21,16 \text{ м}^2$

Результаты проведенных численных экспериментов подтвердили корректность предложенного в [1] метода. В дальнейших исследованиях будут проведены численные эксперименты для моделей с неоднородным грунтом.

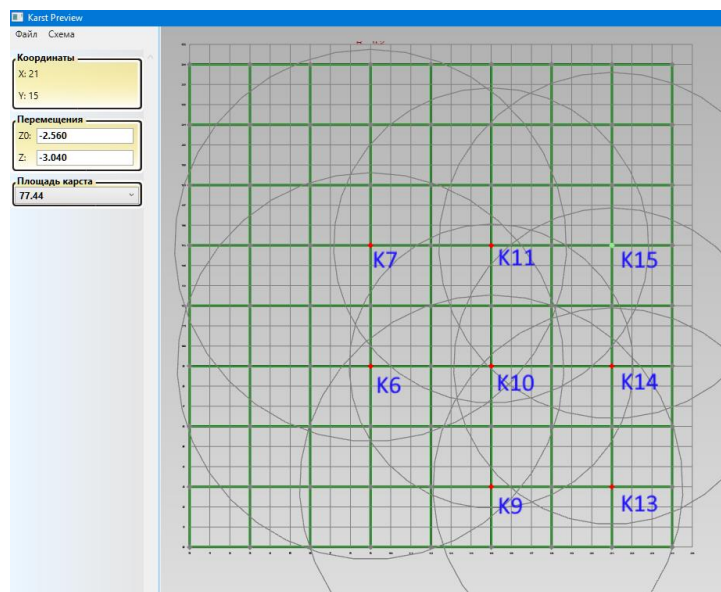


Рис. 7. Пересечение окружностей для кривой, соответствующей площади карстового провала, равной  $77,44 \text{ м}^2$

Разработанное программное средство будет значительно удобнее, если определение центра пересечения окружностей будет выполняться не вручную (визуально) пользователем, а самим программным средством.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кислицын, Д. И. Метод раннего обнаружения карстового провала под строительным объектом / Д. И. Кислицын, П. М. Боковая, И. С. Жильцов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 2 (66) – С. 81–87.

2. SCAD – Вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов. – URL: <https://scadsoft.com/ru/products/scad>. – Текст : электронный.

**KISLITSYN Dmitriy Igorevich, candidate of technical sciences, holder of the chair of information systems and technologies<sup>1</sup>; KHROMYKH Vladislav Evgenevich, postgraduate student <sup>1</sup>, category 1 leading developer<sup>2</sup>**

### NUMERICAL EXPERIMENTS ON THE METHOD OF EARLY DETERMINATION OF THE LOCATION AND DIAMETER OF A KARST SINKHOLE AT THE BASE OF A CONSTRUCTION SITE BASED ON EXISTING SMALL VERTICAL DISPLACEMENTS ON HOMOGENEOUS SOIL

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 433-19-20;  
e-mail: [kislitsyn@nngasu.ru](mailto:kislitsyn@nngasu.ru)

<sup>2</sup>JSC RuPost

26, Varshavskoe Highway, Moscow, 117105, Russia. Tel.: +7 (495) 369-48-16;

e-mail: [info@rupost.ru](mailto:info@rupost.ru)

*Key words:* karst hazard, early detection of karst sinkhole, triangulation method, software "Karst".

---

*The article describes numerical experiments based on the method for early detection of a sinkhole under a construction site to determine the location and size of the sinkhole for the case of homogeneous soil, as well as an example of working with the software "Karst".*

---

## REFERENCES

1. Kislitsyn D. I., Bokovaya P. M., Zhiltsov I. S. Metod rannego obnaruzheniya karstovogo provala pod stroitelnym obektom [Method for early detection of a carst sink under a construction site] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2023. № 2 (66) – P. 81–87.

2. SCAD – Vychislitelny kompleks dlya prochnostnogo analiza konstruktsiy metodom konechnykh elementov [An integrated system for finite element structural analysis]. – URL: <https://scadsoft.com/ru/products/scad>.

© Д. И. Кислицын, В. Е. Хромых, 2023

Получено: 12.10.2023 г.