

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОКРЫТОГО КАРСТА: КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ИНЖЕНЕРНЫХ ЦЕЛЯХ

<https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-10-23>

УДК 556.314:624.131.1:



Фото С.В. Щербакова

ЩЕРБАКОВ С.В.*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, sherbakov.lpmg@mail.ru; ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия, sherbakov@antikarst.ru
Адреса: ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия; ул. Бутлерова, д. 3, г. Дзержинск Нижегородской области, 606000, Россия

КАТАЕВ В.Н.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, kataev@psu.ru

ЗОЛОТАРЕВ Д.Р.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, zolutarev.lpmg@mail.ru; ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия, zolutarev@antikarst.ru

КОВАЛЕВА Т.Г.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, kovalevatg@mail.ru; ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия, kovaleva@antikarst.ru

Аннотация

Исследование посвящено поиску оптимального решения в части комплексирования различных методов прогноза размеров карстово-суффозионных деформаций на поверхности земли или в основании фундаментов неглубокого заложения. Необходимость комплексирования продиктована инженерно-геологическими условиями закарстованных территорий и сложностью их достоверного изучения современными методами исследования (бурение, геофизика и пр.). В этом свете повышение достоверности итогового прогноза находится в прямой зависимости от полноты изучения как размеров наблюдаемых поверхностных карстовых форм, так и особенностей поведения грунтового массива над карстовой полостью. Механизм протекания карстового процесса в толще грунтов определяется, прежде всего, геологическим строением (мощностью и чередованием различных грунтовых слоев), гидрогеологическими условиями и физико-механическими свойствами грунтов. На сегодняшний день известны три основных механизма деформирования грунтов над карстовой полостью: карстово-обвальный, карстово-суффозионный и карстово-суффозионно-обвальный. Даже в условиях одного участка данные механизмы могут чередоваться в течение года, что делает процесс карстообразования в части определения диаметров провалов и оседаний трудно прогнозируемым. Сегодня известны и применяются следующие четыре метода оценки возможных размеров карстово-суффозионных деформаций: 1) метод аналогий, 2) вероятностно-статистический, 3) детерминистический (расчетный) и 4) лабораторное физическое моделирование. Каждый из четырех методов прогноза размеров карстово-суффозионных деформаций имеет свои преимущества и недостатки, что ограничивает возможность применения какого-либо одного из них в различных природных обстановках развития карста. Для повышения объективности и достижения необходимой точности оценки диаметров и глубин поверхностных карстовых деформаций в инженерно-строительных целях рекомендована блок-схема комплексирования различных методов прогноза. В ее основу положены сведения о поверхностной закарстованности района, глубине залегания карстующихся пород и уровне ответственности проектируемого объекта.

Ключевые слова:

карст; карстоопасность; карстовые деформации; провал; оседание; диаметр; глубина; морфометрические параметры

Ссылка для цитирования:

Щербаков С.В., Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ковалева Т.Г., 2018. Поверхностные деформации в условиях покрытого карста: комплексирование методов оценки морфометрических параметров в инженерных целях. Инженерная геология, Том XIII, № 6, с. 10–23, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-10-23>

COVERED KARST LANDFORMS: COMPLEXIFICATION OF METHODS TO ESTIMATION OF MORPHOMETRIC PARAMETERS IN ENGINEERING PURPOSES

SERGEY V. SHCHERBAKOV*

Perm State National Research University, Perm, Russia, sherbakov.lpmg@mail.ru; "Karst and Bank Protection" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia, sherbakov@antikarst.ru

Addresses: Bld. 15, Bukireva St., 614990, Perm, Russia; Bld. 3, Butlerova St., 606000, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia

VALERY N. KATAEV

Perm State National Research University, Perm, Russia, kataev@psu.ru

DENIS R. ZOLOTOREV

Perm State National Research University, Perm, Russia, zolotarev.lpmg@mail.ru; "Karst and Bank Protection" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia, zolotarev@antikarst.ru

TATYANA G. KOVALEVA

Perm State National Research University, Perm, Russia, kovalevatg@mail.ru; "Karst and Bank Protection" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia, kovaleva@antikarst.ru

Abstract

The research is aimed to search of optimal solution in integration of various methods for predicting the sizes of karst-suffosion deformations on the ground surface or at the base of shallow foundations. Necessity of integration is dictated by engineering-geological conditions of the karst areas and the complexity of their reliable study with using modern approaches (drilling, geophysics etc.). From this point of view increasing of authenticity of the final forecast is in direct dependency from completeness of investigation of sizes of observed surface karst forms and features of behavior soils massif above the karst cavity. The mechanism of the karst process in the soils thickness is defined, first of all, by geological structure (thickness and interleaving of different soil layers), hydrogeological conditions and the physical-mechanical properties of soils. At the present day are known three basic mechanisms of soil deformation over karst cavity: karst-collapse, karst-suffosion and karst-suffosion-collapse mechanism. Even in the conditions of one site these mechanisms can be interleave during the year, which makes the karst formation process hard-to-predict in part of diameters of sinkholes and subsidence zones. Today are known and applicable next four methods to estimations of possible sizes of karst-suffosion deformations: 1) method of analogy, 2) probabilistic method, 3) deterministic (calculated) method, 4) laboratory physical modeling method. Each of four methods for predicting the sizes of karst-suffosion deformations has its own advantages and disadvantages, which limit the possibility of using any one of them in different natural environments of karst development. To improve objectivity and reach necessity accuracy of estimation of diameters and depths of surface karst deformations in engineering-geological purposes a block-scheme of integrations of different forecasting methods is recommended. This scheme is based on the data about surface karst area, the depth of occurrence of karst rocks and level of responsibility of the projecting object.

Key words:

karst; karst hazard; karst deformations; sinkhole; subsidence; diameter; depth; morphometric parameters

For citation:

Shcherbakov S.V., Kataev V.N., Zolotarev D.R., Kovaleva T.G., 2018. Covered karst landforms: complexification of methods to estimation of morphometric parameters in engineering purposes. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 6, pp. 10–23, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-10-23>

Введение

Методы пространственного анализа распределения поверхностной закарстованности за последние десятилетия значительно продвинулись вперед. Сегодня изучение распространения поверхностных карстовых форм, сформированных в условиях покрытого карста, трудно представить без применения спутниковых систем навигации, специализированной техники лазерного сканирования земной поверхности, фотометрических данных дистанционных зондирований земли, степень доступности и качества которых выросли в разы. Такие методы позволяют не только ускорять процедуру фиксации поверхностных карстопроявлений, но и в значительной степени повышать точность их позиционирования на местности, осу-

ществлять замеры их морфометрических параметров с точностью до первых сантиметров в различных осях и сечениях [6].

Однако, несмотря на существенный технологический прорыв, наблюдаемый за последние десятилетия, выше отмеченные технические возможности по-прежнему не позволяют дать однозначного ответа на два важных вопроса: каков генезис и механизм образования наблюдаемой поверхностной формы, и каков ее абсолютный возраст?

Первый из поставленных вопросов является в настоящее время практически неразрешимым при проведении полевого этапа изыскательских работ и вряд ли будет разрешен в ближайшем будущем. Для ответа на второй вопрос могут быть применены минералого-петрографиче-

ский, палеонтологический, палеомагнитный, радиоизотопный, палинологический, диатомовый, фторовый, термоминесцентный и другие виды специальных анализов (п. 5.2.10 СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 2. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов»). Однако следует заметить, что их точность относительно невелика и зачастую сильно варьирует для разных проб, отобранных из одной карстовой формы. В ряде случаев результаты, полученные разными методами на одном объекте, и вовсе диаметрально противоположны.

Возможности детального исследования карстовых полостей, вскрываемых при бурении, в противоположность возможностям изучения поверхностных форм карста по-прежнему остаются крайне ограниченными в связи с отсутствием в большинстве случаев возможности их визуального обследования. На сегодняшний день, как и более полувека назад, оценка подземной закарстованности производится по результатам проходки скважин, опробования керна и подземных вод. В отличие от современных технологий картирования поверхностных форм карста, техника производства геофизических исследований (в различных модификациях и вариациях) толщи пород по-прежнему не позволяет с необходимой достоверностью судить не только об особенностях строения и свойствах массива, но и однозначно выявлять карстовые полости и ослабленные зоны в толще карстующихся отложений, не говоря уже об их размерах.

Отмеченные выше ограничения в способах изучения поверхностных и подземных карстовых форм существенным образом сказываются на качестве прогноза размеров (диаметров, глубин) карстовых провалов и оседаний на момент их образования. Для повышения достоверности такого прогноза следует одновременно использовать различные методики оценки, базирующиеся как на изучении размеров наблюдаемых поверхностных карстовых форм, так и на изучении поведения грунтового массива над карстовой полостью. При этом понимание превалирующего механизма образования карстовых деформаций, который зависит от строения покровной толщи грунтов, их свойств, а также структурно-тектонических и гидрогеологических условий массива горных пород, лежит в основе прогнозирования диаметров и глубин провалов и оседаний на поверхности земли.

Механизмы образования поверхностных карстовых деформаций

В инженерном карстведении известны два принципиально разных механизма образования провалов и оседаний поверхности земли в условиях покрытого карста — карстово-обвальный и карстово-суффозионный. Все поверхностные карстовые формы образуются либо по первому, либо по второму сценарию, либо в результате совместного действия обоих этих механизмов (карстово-суффозионно-обвальный). Детально частные случаи механизма формирования провалов и локальных оседаний в карстовых районах рассмотрены в работах [3, 4, 11–13]. Согласно работе [11] с определенной долей приближения карстовые формы в карбонатных породах можно с инженерно-геологической точки зрения считать аналогами карстовых форм в сульфатных породах в отношении механизма их образования.

Принципиальные схемы формирования поверхностных карстовых деформаций по двум выше названным механизмам приведены на рис. 1. Данные схемы являются обобщенными, т.к. не учитывают следующие факторы:

- возможность моментального обрушения покровной толщи грунтов в карстовую полость, залегающую на глубинах, превышающих 20–30 м, в результате чего происходят катастрофические провалы больших диаметров;
- зональность и «этажность» карстового массива, обусловленные наличием нескольких глубинных интервалов развития полостей, приуроченных к разновозрастной или разновозрастным толщам карстующихся пород в геологическом разрезе;
- характер напластования покровных грунтов;
- наличие в покровной толще нескольких водоносных горизонтов;
- наличие, уровни и напор трещинно-карстовых подземных вод;
- характер и масштабы проявления химической суффозии, с которой связано растворение карбонатного и сульфатного цемента в некарстующихся полускальных грунтах (песчаниках, алевролитах и пр.), выщелачивание и деградация глинистых грунтов за счет растворения и выноса солей и др.

Отмеченные выше факторы, безусловно, влияют на ход течения процесса развития деформаций в толще грунтов и на конечную форму и размеры деформации на поверхности земли. Однако при этом общий принцип формирования таких деформаций остается неизменным.

Общим моментом схем А1, А2 и В1 (см. рис. 1) является то, что обрушение полости закладывается в ослабленной зоне в ее сводовой части, либо в некарстующихся перекрывающих грунтах (схемы А1, А2), либо непосредственно в карстующихся породах (схема В1). При сравнительно небольшой структурной прочности пород вследствие собственного веса и давления вышележащих пластов, в сводах таких полостей возникают различные деформации, трещины, что приводит к обрушению пород. Обрушение сводов приводит, в свою очередь, к накоплению обломков, и полость постепенно перемещается вверх. Этот процесс может иметь достаточно длительный период реализации, характеризующийся слабой интенсивностью, в ходе развития которого выделяется ряд стадий различной продолжительности.

Механизм образования провалов в результате обрушения сводов некарстующихся отложений (см. рис. 1, схема А) наблюдается в условиях покрытого карста, в том случае, когда перекрывающая толща представлена рыхлыми четвертичными и подстилающими их коренными глинистыми или полускальными отложениями. Заметим, что своды обрушения закладываются в пределах участков, где породы имеют относительно высокую степень трещиноватости при условии колебаний уровней подземных вод и изменении режимов фильтрации в течение годового цикла от безнапорного до напорного. В конечном счете полость проявляется на поверхности в виде карстово-обвального провала, а в массиве формируется обвальная разуплотненная толща грунтов (см. рис. 1, схема А1). При наличии подземных вод в толще рыхлых дисперсных отложений возможна активизация суффозионного процесса, в результате действия которого в открытую полость постепенно привносится рыхлый мате-

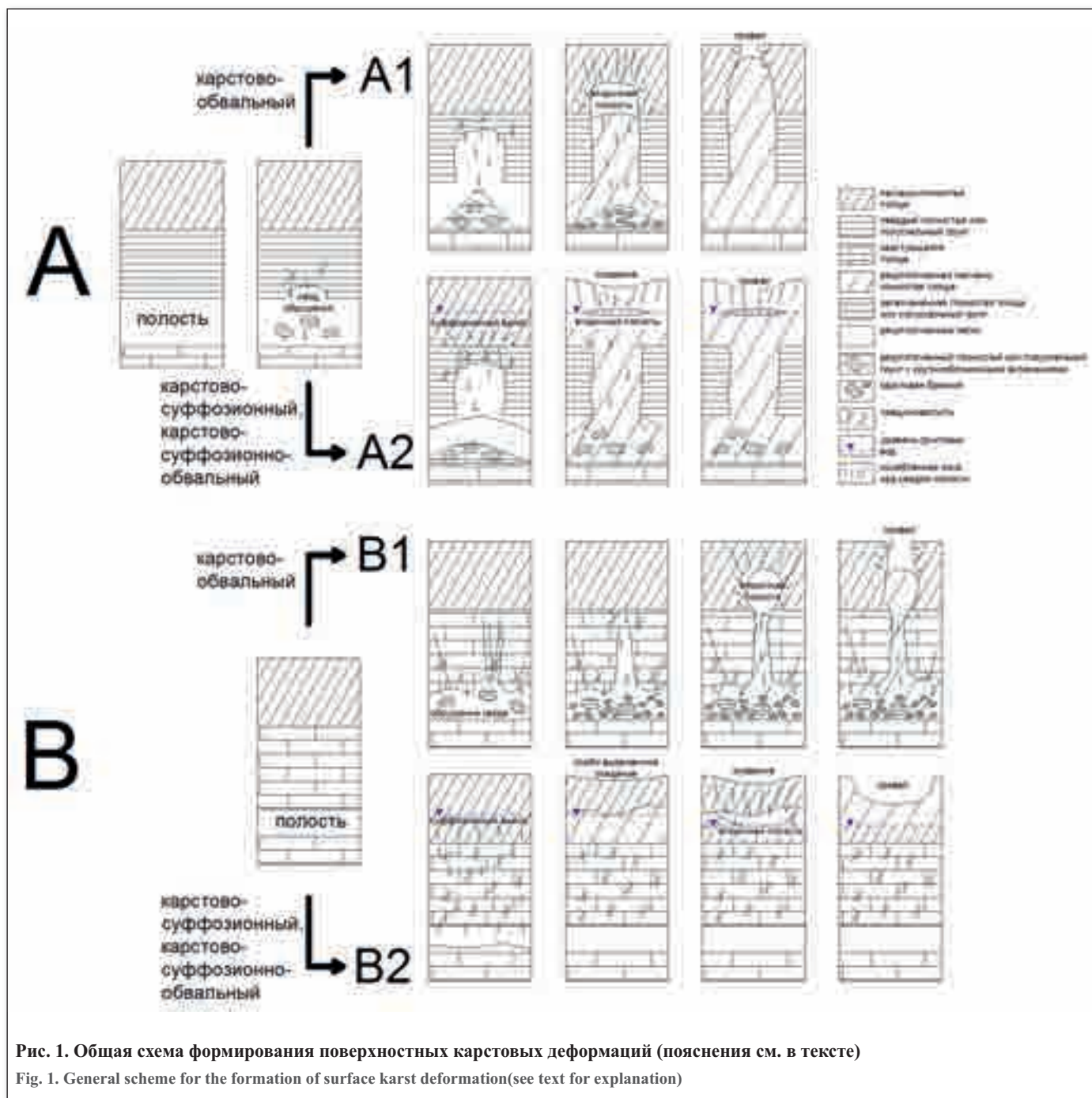


Рис. 1. Общая схема формирования поверхностных карстовых деформаций (пояснения см. в тексте)

Fig. 1. General scheme for the formation of surface karst deformation(see text for explanation)

риал, а на поверхности постепенно формируется карсто-суффозионная просадочная муфта (оседание), а в случае дальнейшего развития суффозионного процесса — карсто-суффозионно-обвальный провал (см. рис. 1, схема A2).

В условиях залегания полости в карстующихся монолитных отложениях (см. рис. 1, схема B1) подготовка обрушения сводовой части происходит на фоне растворения породы в бортах системных субвертикальных трещин, пронизывающих карстовый массив. Вертикальные размеры полостей постепенно увеличиваются по направлению к поверхности, принимая вид органной трубы [2]. По мере дальнейшего растворения и выщелачивания карстующихся отложений полость приближается к толще рыхлых перекрывающих отложений. В определенный момент времени удерживающие усилия в перекрывающей толще отложений сменяются сдвигающими и полость вы-

ходит на поверхность в результате резкого обрушения и образования провала.

Следует отметить, что механизм формирования карсто-суффозионных и карсто-суффозионно-обваль-ных оседаний и провалов, образующихся в условиях заложения полости в толще трещиноватых, раздробленных карстующихся пород, перекрытых песчано-глинистыми грунтами (см. рис. 1, схема B2), принципиально отличается от механизма образования подобных форм в условиях, описываемых схемой A2 (см. рис. 1). В данном случае суффозионный вынос носит более интенсивный характер и может наблюдаться по всей площади поверхности кровли карстующихся пород, что приводит к более широкому развитию локальных оседаний на дневной поверхности, некоторые из которых могут развиваться на протяжении многих лет. Не исключается и образование провалов, в том числе больших диаметров, при условии

залегания карстующейся толщи на значительных глубинах, как правило, превышающих 30 м.

Таким образом, формирование карстово-суффозионных (оседания) и карстово-суффозионно-обвальных (провалы) деформаций (см. рис. 1, схемы А2, В2) становится возможным при соблюдении следующих условий:

- наличие выдержанного по мощности одного или нескольких горизонтов подземных вод, уровни которых подвержены постоянным колебаниям в течение года;
- наличие песчаных или супесчаных прослоев в покровной толще, подверженных суффозионному выносу;
- наличие трещин в кровле карстующихся и перекрывающих их относительно водоупорных глинистых или полускальных грунтов.

Следует сказать, что для формирования локальных оседаний на поверхности земли необязательно наличие полостных коллекторов в толще карстующихся пород. Для их развития достаточным условием является раздробленность и наличие открытых трещин в толще покровных или карстующихся пород. Зачастую, такие участки в толще грунтового массива связаны с зонами дробления в карстующейся толще.

Провалы карстово-суффозионно-обвального генезиса всегда приурочены к зонам разуплотнения грунтов покровной толщи, в которых в интервалах колебания уровня подземных вод, как правило, закладывается одна или несколько небольших по мощности (обычно до 20–30 см) и сложных по форме вторичных полостей, часто вытянутых в горизонтальной плоскости. Именно с локализацией вторичных полостей связана трудность пространственного прогноза провалов такого типа, т.к. существующие методы инженерно-геологического изучения грунтов, залегающих в массиве, не только не позволяют достоверно определять их размеры, но и однозначно выявлять такие полости.

В целом на диаметры карстово-суффозионно-обвальных провалов определяющее влияние оказывает положение уровня подземных (грунтовых и трещинно-карстовых) вод. Так, снижение уровня подземных вод ведет к уменьшению давления на кровлю полости и повышению прочности пород водопроницаемой кровли за счет увеличения значений сцепления и угла внутреннего трения осушенной толщи. Это приводит к тому, что обрушение кровли полости и образование провала происходят при большей ширине полости, чем до снижения уровня воды. Таким образом, в этом случае интенсивность провалов, при прочих равных условиях, уменьшается, а диаметр их увеличивается. Обратная картина наблюдается при повышении уровня грунтовых вод, в результате чего интенсивность образования провалов повышается, а их диаметры уменьшаются [11].

Диаметры карстово-суффозионно-обвальных провалов, образующихся по схеме А2 (см. рис. 1), как правило, незначительны и редко превышают 3 м. Диаметры карстово-суффозионно-обвальных провалов, сформированных по механизму, приведенному на схеме В2 (см. рис. 1), наоборот, могут варьировать в широких пределах — от первых метров до 30–40 м и более. Однако выше отмеченная закономерность нередко не работает. В любом случае прогноз диаметров провалов карстово-суффозионно-обвального типа на сегодняшний день не является однозначным.

Ко всему вышеизложенному следует добавить, что случаи развития процесса провалообразования только по «классическому», карстово-обвальному, механизму достаточно редки. В действительности гидрогеологические условия, в которых находится грунтовый массив, в течение года могут существенно изменяться. При этом механизмы развития карстовых деформаций также могут чередоваться ($A1 \rightarrow A2 \rightarrow A1$, $B1 \rightarrow B2 \rightarrow B1$, см. рис. 1). К сожалению, объективно количественно оценить вклад каждого из двух обозначенных выше механизмов даже в процентном соотношении для конкретной карстовой формы, одновременно рассматривая ее в привязке к инженерно-геологическим условиям в месте ее локализации, на сегодняшний день не представляется возможным. А ведь именно генезис карстопроявлений во многом предопределяет необходимость применения тех или иных противокарстовых мероприятий или их комплекса.

Отдельно стоит упомянуть, что схемы А и В (см. рис. 1) не являются строго самостоятельными и могут в различных пропорциях накладываться друг на друга в зависимости от геологического строения массива.

В заключение отметим, что далеко не всегда карстовая полость в процессе своего развития достигает приповерхностной части и приводит к формированию оседания или провала. Нередки случаи, когда объем накапливаемого обрушенного и разрыхленного материала превосходит объем пород в естественном плотном залегании в условиях пласта, что зачастую ведет к смыканию обвальной части со сводом полости, после чего обвальный процесс затухает и полость более не развивается. В толще массива образуется раздробленная разуплотненная зона пород, которая в ходе дальнейшего развития, привноса дисперсных частиц и уплотнения обломочного материала, превращается в карстовую брекчию.

Подходы к определению диаметров поверхностных карстовых деформаций

На сегодняшний день в практике карстологического прогноза в разной степени применяются следующие методы оценки размеров поверхностных карстовых деформаций (табл. 1; п. 5.2.12 СП 11-105-97, ч. 2):

- метод аналогий;
- вероятностно-статистический;
- детерминистический (расчетный);
- лабораторное физическое моделирование.

Метод аналогий

Метод аналогий является одним из базовых методов качественного прогноза размеров поверхностных карстовых деформаций. Данный подход и по сей день широко используется в целях карстологического прогноза. Его суть сводится к тому, что исследуемый участок наделяется количественными оценками карстоопасности, установленными по некоторому эталонному участку. Обоснование такой аналогии становится возможным, когда условия развития карста на обоих участках примерно одинаковые, что выражается в общности структурно-тектонического строения, инженерно-геологических, геоморфологических и гидрогеологических условий в их пределах.

Преимуществом метода аналогий является простота производства оценки. Данный подход широко применяется в инженерной практике на начальных стадиях реализации проектов (технико-экономическое обоснование),

т.к. фактически не требует вложений дополнительных инвестиций, направленных на углубленное изучение карстологических условий.

Метод аналогий, в виду выше отмеченной простоты реализации, достаточно часто применяется при составлении региональных и локальных мелко- и среднемасштабных карт районирования закарстованных территорий по степени карстоопасности. Примером такой карты может служить карта карстоопасности Земли Гессен (Германия), построенная по принципу выделения однотипных участков, для каждого из которых установлен диапазон изменения диаметров карстовых провалов и их средние значения [1].

Недостатком метода является невысокая точность прогноза, в котором не учитываются отдельные особенности строения конкретной площадки, механизмы образования деформаций. Наконец, данный подход подразумевает качественный перенос численных величин с одного участка на другой, не имея при этом под собой никакой расчетной базы или количественной подосновы. Многие вопросы экспертной оценки в целях карстологического прогноза проработаны и авторами данной публикации [8].

Вероятностно-статистический подход

В рамках вероятностно-статистического или просто статистического подхода к прогнозу размеров карстовых деформаций можно выделить три самостоятельных направления, нашедших применение в научно-практических целях.

Первый, наиболее широко известный и часто применяемый, метод статистического анализа сводится к изучению статистического ряда значений, например, диаметров провалов (оседаний), ранее происходивших в районе исследований [10, 15] (табл. 1, метод S1). Если сведений о случаях провалообразования в районе работ нет, то статистический ряд может быть составлен: 1) по результатам полевой карстологической съемки воронок и понижений, развитых в данном районе; 2) по данным дешифрирования крупномасштабных космоснимков и топографических планов (планшетов) как актуальных на момент исследования, так и составленных в прошлые годы. Имея репрезентативную выборку исследуемого параметра карстово-суффозионных деформаций, как правило, превышающую 20–30 значений, достаточно легко строятся интегральная и дифференциальная кривые или гистограммы его распределения. Анализ данных кривых позволяет установить тип теоретического распределения и определить среднее и максимальное значения исследуемого параметра (рис. 2). Так, на сегодняшний день известно, что распределения диаметров и глубин поверхностных карстово-суффозионных деформаций подчиняются логнормальному, реже нормальному, законам распределения [11, 5].

Точность прогнозной оценки размеров новых карстопроявлений по среднему статистическому значению ранее происходивших поверхностных деформаций, в целом, достаточно высокая и, пожалуй, является наилучшей из всех существующих методов. При этом надежность прогноза повышается при соблюдении следующих условий:

- в анализируемой выборке фигурируют однотипные деформации — одинаковые по механизму образования (см. рис. 1);
- карстопроявления приурочены к участкам со схожим геологическим строением;

- при прочих равных условиях, надежность прогноза по статистическому ряду размеров ранее происходивших провалов (оседаний) выше, чем по ряду, полученному из размеров воронок (понижений), отснятых в поле или с картографических материалов. Размеры последних на момент их описания могут значительно отличаться от первоначальных размеров на момент образования деформации.

Нетрудно заметить, что ограничением данного метода является невозможность его применения при фактическом отсутствии в районе исследований поверхностных карстовых деформаций.

Второе и третье направления оценки размеров поверхностных карстовых деформаций с применением статистического подхода сводятся к применению многомерного статистического анализа по выявлению взаимосвязей между:

- размерами подземных карстовых форм (полостей, зон дробления) и их влиянием на размеры поверхностных карстовых деформаций (см. табл. 1, метод S2);
- факторами развития карста (структурно-тектоническими, геологическими, гидрогеологическими, геоморфологическими и др.) и их влиянием на размеры поверхностных карстовых деформаций (см. табл. 1, метод S3).

Для решения задач по выявлению выше отмеченных взаимосвязей применяется корреляционно-регрессионный анализ, в различной степени сочетаемый с факторным, дисперсионным, кластерным и другими видами многомерного статистического анализа.

Примером реализации прогностической зависимости между средним диаметром провальных поверхностных карстовых форм и высотами (мощностями) подземных полостей и зон дробления (см. табл. 1, метод S2) посредством двухмерного корреляционно-регрессионного анализа может служить территория Пермского Предуралья (рис. 3) [15].

В инженерно-карстологической практике задачи по выявлению зависимостей между факторами развития карста и закарстованностью (см. табл. 1, метод S3) наиболее часто решаются применительно к прогнозированию параметров площадной закарстованности, таких как плотность карстовых форм или интенсивность их развития [5, 7, 10, 14, 17]. Однако в последние годы наметилась тенденция к применению такого подхода и к прогнозированию размеров карстовых деформаций [16, 20, 21].

Рассмотренные выше статистические методы прогноза размеров поверхностных карстовых деформаций, в основе которых лежат многомерные статистические процедуры (см. табл. 1, методы S2, S3), трудно реализуемы в практике повседневных инженерно-геологических работ на объектах малой и средней крупности. Для построения устойчивых зависимостей требуется максимально тщательная подготовка первичных материалов, которая возможна только при детальном изучении инженерно-геологических условий развития карста (бурение карстологических скважин по плотной сети наблюдения с многократным послойным опробованием грунтов, геофизические исследования повышенной детальности и пр.). Такие объемы исследований, как правило, идут вразрез с экономической составляющей реализации абсолютного большинства «небольших» проектов.

В то же время построение статистически обоснованных прогностических зависимостей в рамках отдельно

Подходы и методы прогнозирования линейных размеров поверхностных карстовых деформаций
Approaches and methods for predicting the linear sizes of surface karst deformations

№ п/п	Подходы	Методы	Механизм карстовых деформаций*	Вид карстовых деформаций	Прогнозируемые параметры деформаций**	Точность оценки***	Трудоемкость****
1	Метод аналогий	E Определение размеров карстопоявлений методом аналогий, т.е. посредством присвоения таких размеров, которые характерны для другой, наиболее изученной площадки, расположенной в схожих природных обстановках развития карста	KO	провалы	диаметр, глубина	+	+
			KC, KCO	оседания, провалы		+	
2	Вероятностно-статистический	S1 Анализ размеров ранее происходивших карстовых деформаций и/или существующих поверхностных карстовых форм (воронки, понижения)	KO	провалы	диаметры, глубина	++++	++
			KC, KCO	оседания, провалы		+++	
		S2 Анализ размеров подземных карстопоявлений и их влияния на размеры поверхностных карстовых деформаций (корреляционно-регрессионный)	KO	провалы	диаметр, глубина	++	++++
			KC, KCO	оседания, провалы		+	
		S3 Анализ факторов развития карста и их влияния на размеры поверхностных карстовых деформаций (корреляционно-регрессионный, дисперсионный, факторный, кластерный анализы, искусственные нейронные сети и пр.)	KO	провалы	диаметр, глубина	++	++++
			KC, KCO	оседания, провалы		+	
3	Детерминистический (расчетный)	D1 Аналитические математические уравнения и зависимости, базирующиеся на известных законах прочности дисперсных сред	KO	провалы	диаметр	++	+++
			KC, KCO	оседания, провалы		++	
		D2 Численное компьютерное моделирование карстового процесса методом конечных элементов, базирующееся на известных законах прочности дисперсных сред	KO	провалы	диаметры, глубины	+++	+++
			KC, KCO	оседания, провалы		+	
4	Лабораторное физическое моделирование	N Физическое моделирование карстового процесса в лабораторных условиях на открытых или закрытых стендах	KO	провалы	диаметры, глубины	+++	++++
			KC, KCO	оседания, провалы		+++	

Примечания: * KO — карстово-обвальная; KC — карстово-суффозионная; KCO — карстово-суффозионно-обвальная.

**При возможности установления прогнозируемых параметров карстовых деформаций в различных сечениях они употребляются во множественном числе.

***Точность оценки тем выше, чем больше плюсов.

****Трудоемкость представляет собой показатель, в интегральной форме характеризующий объем материальных и временных затрат для проведения анализа. Трудоемкость тем выше, чем больше плюсов.

взятого города или даже региона с целью дальнейшего практического использования видится крайне перспективным направлением. Их применение позволит на количественном уровне и более обосновано, по сравнению с экспертными методами, определять величины диаметров и глубин вновь ожидаемых провалов и оседаний.

Детерминистический подход

Детерминистический или расчетный подход предполагает определение размеров поверхностных карстовых деформаций с применением аналитических решений (см. табл. 1, метод D1) или численного компьютерного моделирования (см. табл. 1, метод D2).

Модельной базой для детерминистического подхода служит разделение грунтовой толщи, залегающей над полостью, на отдельные инженерно-геологические слои или элементы, характеризующиеся общностью состава, состояния и свойств грунтов в их пределах. В расчетах также учитываются уровни подземных вод (грунтовых, пластовых, трещинно-карстовых), может быть учтена трещиноватость пород, а также внешнее давление от проектируемого сооружения или объекта. Теоретической основой детерминистического метода являются известные механические законы потери прочности грунтов. Наиболее часто в практических расчетах применяются теории прочности Кулона-Навье или Кулона-Мора, реже — Хоека-Брауна, Друкера-Прагера и др. Общим моментом всех теорий является предположение об обрушении грунтов, залегающих над полостью критического диаметра, по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Под критическим понимается такое значение диаметра полости, выше которого происходит неминуемое обрушение перекрывающих грунтов.

Нетрудно заметить, что приведенные выше теории прочности могут быть в определенной степени применены для прогнозирования размеров провалов карстово-обвального типа. Если же речь идет о прогнозе размеров провалов и тем более оседаний карстово-суффозионного и карстово-суффозионно-обвального типов, то математические решения в значительной степени усложняются, т.к. суффозионное истечение грунтов в полость или по системе трещин в карстующихся породах не поддается прогнозированию в рамках известных теорий прочности грунтов.

Исторически сложилось, что в отечественном инженерном карстоведении наибольшее развитие получили аналитические методы расчета (см. табл. 1, метод D1). Преимуществом данных решений является их изначальная адаптация применительно к решению карстологической задачи. Аналитические решения сводятся к набору формул, позволяющих рассчитывать конкретные величины карстовых деформаций — в абсолютном большинстве случаев это диаметры провалов. Многие из них детально проанализированы в работах [4, 10–13]. В зарубежной карстологической практике аналитические методы расчета также широко известны [1]. Однако степень их проработки и схематизации применительно к решению конкретных практических задач значительно уступает отечественным аналогам.

Существуют как универсальные аналитические решения, ориентированные на определение диаметров провалов в условиях различного напластования грунтов, так и схематизированные, применение которых возможно только при строго определенном напластании грунтов покровной толщи и гидрогеологических условиях. Прогностическая способность последних решений является более высокой по сравнению с первой группой методов. Например, универсальные решения [10] приводят к значительному завышению диаметров провалов при мощности покровной толщи, превышающей 20–30 м, или сложенной преимущественно глинистыми грунтами. С другой стороны, решения, базирующиеся на схематизации геолого-гидрогеологического разреза, являются сугубо индивидуальными и, как правило, ориентированы на решение задач под конкретные частные случаи.

С начала 2000-х годов с развитием компьютеризации наметилась тенденция к применению численных методов решения при прогнозировании размеров поверхностных

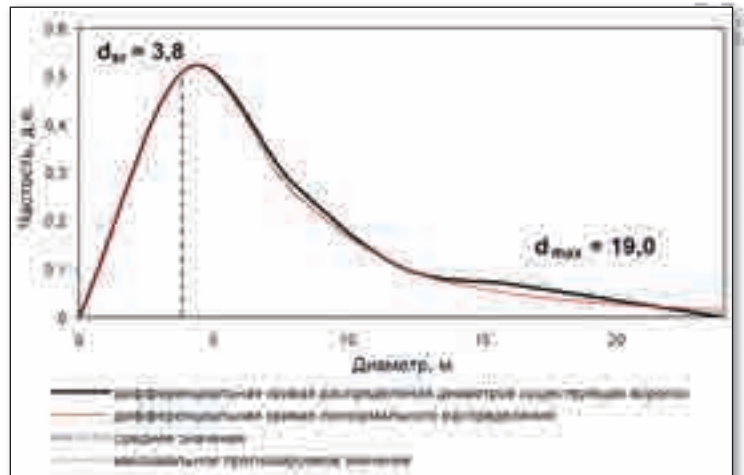


Рис. 2. Распределение диаметров закартированных в Пермском крае (пос. Орда) карстовых воронок и его теоретическое описание логнормальным законом: прогнозные значения среднего (d_{sp}) и максимального диаметров провалов (d_{max})

Fig. 2. Actual distribution of diameters of karst sinkholes in Permian kray (Orda) and its theoretical representation using lognormal law: prognostic mean (d_{sp}) and maximum (d_{max}) diameters of sinkholes



Рис. 3. Взаимосвязь между средними диаметрами поверхностных карстовых форм и высотами (мощностями) карстовых полостей и зон дробления, установленная для территории Пермского Предуралья [15]

Fig. 3. Relationship between mean diameters of sinkholes and the heights (thicknesses) of karst cavities and fractured zones for Perm Pre-Ural region [15]

карстовых деформаций (см. табл. 1, метод D2). Наиболее широко данный подход применяют американские и китайские исследователи [18]. К безусловным преимуществам применения компьютерного моделирования по сравнению с аналитическими решениями можно отнести следующие (рис. 4):

- наглядность создаваемой модели как в части геолого-гидрогеологического строения, так и в части прикладываемых внешних нагрузок;
- возможность учета в модели трещиноватости грунтов при различной протяженности, ширине раскрытия и ориентации трещин;
- стадийное прогнозирование развития деформаций в покровной грунтовой толще, включающее форми-



Рис. 4. Конечно-элементная модель двухслойной покровной толщи грунтов над карстовой полостью: 1 — карстовая полость некритической ширины; 2 — зона возможного развития вывала глинистых грунтов в карстовую полость, в результате которого вероятно образование вторичной карстовой полости; 3 — зона развития в песчаной толще деформаций, сопровождающихся формированием вторичных полостей и общим разрыхлением песков

Fig. 4. Finite-element model of two-layered covered soil thickness above the karst cavity: 1 — karst cavity of non critical diameter; 2 — zone of probable caving development of clayed soils into karst cavity (as a result can be formed secondary karst cavity); 3 — zone of deformations development in sand thickness accompanied by the forming of secondary cavities and loosening of sands

рование промежуточных полостей с оценкой их размеров;

- прогнозирование диаметров как провалов, так и оседаний;
- возможность расчета эффективности применяемых конструктивных (моделирование фундаментов) и геотехнических решений (моделирование геосинтетических решеток, закрепления грунтов) при образовании провалов и оседаний поверхности.

Однако отмеченные выше преимущества численных решений, как это ни парадоксально, в то же время являются и их недостатками. Результаты численного моделирования сводятся к набору моделей, отражающих поведение грунтов в части развития и распространения напряжений, изменения абсолютных и относительных вертикальных, горизонтальных и объемных деформаций и ряда других параметров. Данные модели требуют дополнительной интерпретации с позиций решаемой карстологической задачи. Иными словами, результаты компьютерного моделирования невозможно трактовать однозначно, указывая на конкретное значение диаметра провала или оседания, как в случае применения аналитических формул. Отсюда вытекает основной недостаток численных решений, который заключается в повышенной субъективности итоговых оценок, в частности, при моделировании ситуаций, когда в толще пород развита полость некритического диаметра (см. рис. 4). Субъективизм в данном случае заключается в следующих аспектах решаемой задачи:

- размеры и геометрические параметры полости в толще пород невозможно **однозначно** определить

существующими на сегодняшний день методами исследования грунтового массива. Как следствие, ее диаметр принимается экспертным способом;

- местоположение и размеры вторичной полости, которая может сформироваться в перекрывающей грунтовой толще в результате возможного внутреннего вывала грунта (без образования провала на поверхности земли) в первичную карстовую полость или в результате развивающейся в покровной толще суффозии (как механической, так и химической) могут быть определены весьма ориентировочно по анализу изменения полей деформаций;
- численные решения обладают слабой прогностической способностью в отношении прогнозирования суффозии массы грунта.

Подводя итог, следует отметить, что с выходом СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» расчетный подход является основным и безальтернативным методом определения диаметра карстовых деформаций для целей промышленного и гражданского строительства. Данное требование, естественно, является крайне спорным, но это предмет для дискуссии в рамках отдельной статьи.

Лабораторное физическое моделирование

Так как наблюдения за поведением покровной толщи грунтов над полостью в природных условиях поставить нереально, ввиду целого ряда объективных причин, единственным методом, наглядно демонстрирующим данный процесс, является лабораторное физическое моделирование в специальных стендах с прозрачными стенками. Стенд для физического моделирования позволяет воспроизвести уменьшенную «копию» той части грунтового массива, которая расположена над карстовой полостью или толщей трещиноватых карстующихся пород. В зависимости от конструкции стенда можно вести наблюдения в одной плоскости (плоские стенды) или в объеме при различных геолого-гидрогеологических условиях и режимах фильтрации подземных вод, тем самым моделируя различные сценарии и механизмы образования провалов. В качестве материалов для моделирования грунтовой толщи используются:

- реальные грунты, отобранные на участке изысканий;
- грунтовые материалы, обладающие физико-механическими свойствами, близкими к грунтам в условиях реального залегания (например, сухой плотный кварцевый песок при моделировании без учета гидрогеологических условий ведет себя как водонасыщенная песчаная толща);
- эквивалентные или искусственные материалы, обладающие физико-механическими свойствами, близкими или подобными моделируемому грунту (цементные смеси, алебастр, тальк, порошковые глинистые материалы, слюда и пр.).

В отечественном инженерном карстоведении серии опытов и экспериментов по лабораторному физическому моделированию провального процесса целенаправленно ставились в 1970–80-е гг. на базе Дзержинской карстовой лаборатории ПНИИИС Госстроя СССР (ныне ООО «Противокарстовая и береговая защита») [11]. В 1990-е и начиная с 2000-х гг. эксперименты проводились и проводятся в г. Дзержинске на базе ООО «Противокарстовая и береговая защита» и ЗАО НПЦ «Карст» [9], в Националь-

ном исследовательском Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ) [12, 13] и Пермском государственном национальном исследовательском университете (ПГНИУ) (рис. 5). В зарубежной инженерно-карстологической практике физическое моделирование стало применяться с конца XX–начала XXI века. Наибольшее развитие данный метод получил в Китае и США [19].

Основное преимущество физического моделирования заключается в возможности наглядно оценить наиболее вероятный механизм образования поверхностных деформаций в конкретных условиях геологического строения и гидрогеологического режима подземных вод. Лабораторный опыт позволяет выявить зоны развития вторичных полостей, оценить их размеры, а также размеры оседания и провала на грунтовой поверхности в модели и, согласно критерию подобия, перенести результаты опыта в реальные условия развития карста.

Недостатком лабораторных экспериментов по моделированию карстовых деформаций является высокая трудоемкость и сложность постановки опыта. Также следует учитывать, что любой опыт моделирует некоторую усредненную ситуацию, так как в условиях моделирования на стенде физически невозможно:

- учесть все многообразие размеров и форм подземных карстовых полостей, являющихся приемником выносимого песчаного и обрушающегося глинистого грунтового материала покровной толщи;
- с абсолютной точностью воспроизвести особенности напластования (наличие мельчайших прослоек и линз, включений крупнообломочных частиц и пр.) и свойства реальных грунтов.

Приняв во внимание указанные выше недостатки, следует отметить, что в отечественной карстологической практике существует мнение о том, что к данным о численных параметрах карстовых деформаций, полученным методом лабораторного эксперимента, следует относиться как к сугубо ориентировочным [11].

Комплексирование методов прогноза размеров поверхностных карстовых деформаций в инженерно-строительных целях

Отметим, что все методы прогноза размеров поверхностных карстовых деформаций, в том числе и перечисленные выше, имеют свои преимущества и недостатки, достоинства и ограничения. Применение какого-либо одного метода без учета остальных может привести к ошибочному представлению о карстоопасности участка, порою значительно завысив или занижив результаты оценки. Отсюда совершенно очевидной является необходимость максимального комплексирования различных подходов при оценке размеров локальных оседаний и провалов. В действующих на территории Российской Федерации строительных нормах данное требование закреплено пунктом 5.2.12 СП 11-105-97, ч. 2.

При комплексировании методов прогноза параметров поверхностных карстовых деформаций следует максимально учитывать природно-техногенные условия развития карста, а именно:

1) особенности поверхностной закарстованности района работ (наличие разновозрастных воронок и понижений, карстовых логов и котловин, их плотность и ориен-



Рис. 5. Установка для моделирования провалообразования (конструкция Д.М. Димухаметова, ПГНИУ)

Fig. 5. Stand-installation for modeling of karst-suffosion processes (constructed by D.M. Dimukhametov, Perm State University)

тацию в пространстве, приуроченность к определенным геоморфологическим элементам рельефа);

2) структурно-тектонические условия (наличие разломов и зон активных неотектонических движений), геологическое строение и гидрогеологические условия площадки с учетом инженерно-геологической типизации грунтового разреза;

3) стадию проектирования и уровень ответственности проектируемых сооружений.

Сочетание различных методов прогноза позволяет не только повысить точность оценки, но и косвенно определить наиболее вероятный механизм образования провалов, от которого, как показано ранее, в полной мере зависит итоговый диаметр.

Блок-схема оптимального, по нашему мнению, комплексирования различных методов приведена в табл. 2. Данная схема, конечно, является условной, так как не учитывает широкого спектра карстологических условий. Однако она задает определенное направление выбора комплекса методов, устанавливает их приоритет в зависимости от неоднозначности и полноты данных о геолого-карстологическом строении участка. В основу схемы комплексирования методов прогноза размеров поверхностных карстовых деформаций положены следующие факторы:

1) количество воронок, развитых в районе работ, их возраст и форма в разрезе;

2) глубина залегания и состояние карстующихся пород.

Блок-схема комплексирования подходов и методов прогнозирования размеров поверхностных карстовых деформаций в зависимости от природно-техногенных условий развития карста
Block-scheme to integration of approaches and methods for predicting the size of surface karst deformations depending on the natural and man-made conditions for the development of karst

Подходы и методы		Природно-техногенные условия развития карста и рекомендуемые процентные соотношения комплексирования подходов к оценке линейных размеров поверхностных карстовых деформаций*, ***				
		I	II	III	IVa	IVb
Метод аналогий**	E	- / -	- / -	- / -	10 / 5	30 / 10
Вероятностно-статистический	S1	80 / 90	50 / 60	30 / 40	- / -	- / -
	S2	- / -	5 / -	5 / 5	10 / 10	- / -
	S3	- / -	5 / -	10 / 5	15 / 10	30 / 20
Детерминистический (расчетный)	D1	10 / 5	20 / 20	20 / 15	25 / 15	10 / -
	D2	10 / 5	20 / 15	30 / 25	35 / 40	20 / 40
Лабораторное физическое моделирование	N	- / -	- / 5	5 / 10	5 / 20	10 / 30

Примечания: *В числителе дроби приведены значения для зданий и сооружений пониженного и нормального уровня ответственности, в знаменателе — для особо ответственных сооружений.

**Метод рекомендуется в качестве основного и может применяться без комплексирования на ранних стадиях реализации проектов (обоснование инвестиций).

***I — в районе работ развиты разновозрастные воронки и понижения, регулярно происходят и фиксируются случаи образования оседаний и провалов.

II — в районе работ развиты разновозрастные воронки и понижения, в т.ч. молодые карстовые воронки, условный возраст образования которых не превышает 10–20 лет. Молодые воронки цилиндрической, конусообразной, реже чашевидной формы в профиле.

III — в районе работ развиты древние карстовые воронки и понижения, условный возраст образования которых 20–100 лет и более. Древние воронки преимущественно блюдцевидной, реже чашевидной формы в профиле.

IVa — поверхностные карстовые формы в районе работ отсутствуют, карстующиеся породы, в толще которых развиты пустоты и трещины, залегают на глубине до 50 м. Основные условия развития карста соблюдены.

IVb — поверхностные карстовые формы в районе работ отсутствуют, карстующиеся породы залегают на глубинах, превышающих 50–70 м. Основные условия развития карста соблюдены.

Нетрудно заметить, что данные факторы в значительной степени взаимосвязаны. История изучения развития покрытого карста на примере различных площадок показывает [15], что участки с высокой плотностью поверхностных карстовых форм обычно связаны с неглубоким залеганием кровли карстующихся отложений, характеризующихся повышенной трещиноватостью, раздробленностью и наличием полостей. С увеличением глубины залегания карстующейся толщи интенсивность карстового процесса, как правило, снижается, уменьшается и плотность поверхностных форм. Данная тенденция связана не только с уменьшением степени раздробленности карстующейся толщи с глубиной, но и с увеличением мощности покровной толщи, с особенностями ее строения. При этом логично предположить, что в самом общем случае, сложность строения покровной толщи в части количества и особенностей переслаивания различных по своим свойствам и качествам грунтовых слоев и прослоев возрастает с увеличением ее мощности.

Само по себе наличие в районе проведения исследований поверхностных проявлений карста ставит вероятностно-статистический метод анализа (см. табл. 2, метод S1) их возможных параметров в приоритетное положение. При этом приоритет метода тем выше, чем моложе наблюдаемые карстопоявления. При наличии данных многолетнего

мониторинга за образованием провалов данный метод может быть обоснован как единственно верный без комплексирования с другими подходами. К сожалению, недавно вышедшая редакция СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» в части пункта 6.12.12 не допускает возможности применения статистического подхода даже в таких случаях.

Метод аналогий (см. табл. 2, метод E) целесообразно применять в условиях отсутствия фактических данных о поверхностной закарстованности при инженерных изысканиях для объектов пониженного, а при соответствующем обосновании и нормального уровня ответственности. По нашему мнению, при проектировании особо ответственных сооружений метод аналогии следует использовать чисто в справочных целях. Данный метод целесообразно рассматривать как основной на ранних стадиях разработки проектов (обоснование инвестиций).

Основой для прогноза ориентировочных размеров и отчасти механизмов образования провалов в условиях отсутствия карстовых форм и глубокого залегания карстующейся толщи могут служить статистические методы, базирующиеся на анализе взаимосвязей между подземной закарстованностью, факторами развития карста и параметрами поверхностных карстовых форм (см. табл. 2, ме-

тоды S2, S3). Данные методы особенно полезны, когда в исследуемом районе на уровне прогностических зависимостей известны региональные закономерности развития карста.


Расчетные методы прогноза диаметров карстовых деформаций (см. табл. 2, методы D1, D2) следует рассматривать в качестве основных в районах, где сведения о поверхностных карстовых проявлениях практически отсутствуют или развиты древние карстовые воронки и понижения, преимущественно блюдцевидной, реже чашевидной формы в профиле, условный возраст образования которых 50–100 лет и более. Для повышения объективности расчетных методов в таких условиях рекомендуется их комплексирование с методами лабораторного физического моделирования (см. табл. 2, методы N), статистического анализа (см. табл. 2, методы S2, S3) и аналогий (см. табл. 2, метод E).

К методам лабораторного физического моделирования следует обращаться, когда точный механизм образования карстовой деформации на поверхности земли вследствие сложности строения покровной толщи установить другими методами не представляется возможным. Также методы физического моделирования рекомендуется применять при проектировании масштабных особо опасных объектов в сложных инженерно-геологических условиях.

Заключение

Инженерно-геологические условия закарстованных территорий практически всегда характеризуются определенной сложностью. Максимальная полнота и детальность их изучения прямым образом влияет на достоверность итоговой оценки карстоопасности как в отношении интенсивности развития карстовых деформаций, так и в

части прогноза их размеров. При оценке размеров провалов и оседаний на дневной поверхности в условиях открытого карста следует учитывать следующие моменты:

1. Размеры поверхностных карстовых деформаций зависят от механизма протекания карстового процесса, который определяется геологическим строением (мощностью и чередованием различных грунтовых слоев), гидрогеологическими условиями и физико-механическими свойствами грунтов. На сегодняшний день известны три основных механизма деформирования грунтов над карстовой полостью: карстово-обвальный, карстово-суффозионный и карстово-суффозионно-обвальный. Даже в условиях одной площадки данные механизмы могут чередоваться в течение года, что делает процесс карстообразования в части определения диаметров провалов и оседаний трудно прогнозируемым.
2. Неоднозначность и трудность прогноза размеров карстовых деформаций требует применения и учета как можно большего количества методов и подходов. Для решения данной задачи сегодня известны и применяются следующие четыре метода: аналогий, вероятностно-статистический, детерминистический (расчетный) и лабораторное физическое моделирование.
3. Для повышения объективности и достижения необходимой точности оценки диаметров и глубин поверхностных карстовых деформаций в инженерно-строительных целях рекомендована блок-схема комплексирования различных методов прогноза. В ее основу положены сведения о поверхностной закарстованности района, глубине залегания карстующихся пород и уровне ответственности проектируемого объекта. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адерхолд Г., 2010. Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий, под ред. Е.В. Копосова, пер. с нем. В.В. Толмачева, ННГАСУ, Нижний Новгород.
2. Андрейчук В.Н., Дорофеев Е.П., Лукин В.С., 1990. Органые трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещер. Пещеры. Проблемы изучения, Вып. 22, с. 16–23.
3. Андрейчук В.Н., 1999. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Прут, Черновцы.
4. Аникеев А.В., 2017. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. РУДН, Москва.
5. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н., 2010. Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории. Инженерная геология, № 4, с. 34–46.
6. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н., 2017. Идентификация поверхностных форм карста по материалам спутниковых изображений. Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Сборник статей 37-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 2017, с. 193–197.
7. Зиангиров Р.С., Миронов Н.А., Пендин В.В., 1986. Применение многомерного корреляционно-регрессионного анализа для оценки и прогноза устойчивости закарстованной территории. Инженерная геология, № 3, с. 55–64.
8. Катаев В.Н., Ковалева Т.Г., 2013. Роль экспертной оценки в карстологическом прогнозе. Фундаментальные исследования, № 8, с. 1130–1135.
9. Нещеткин О.Б., 2017. Механизм образования карстовых провалов. Часть 1. Моделирование. Инженерная геология, № 5, с. 40–51.
10. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П., 1986. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. Стройиздат, Москва.
11. Толмачев В.В., Ройтер Ф., 1990. Инженерное карстование. Недра, Москва.

12. Хоменко В.П., 2003. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. GEOS, Москва.
13. Хоменко В.П., 2015. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности. Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах, Материалы Международного симпозиума, Пермь, 2015, с. 50–60.
14. Щербаков С.В., Катаев В.Н., 2011. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгура). Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, Том 153, кн. 1, с. 203–224.
15. Щербаков С.В., Катаев В.Н., 2013. К оценке морфометрических параметров карстовых форм. Инженерная геология, № 1, с. 56–64.
16. Щербаков С.В., Катаев В.Н., 2016. Механические свойства дисперсных грунтов покровной толщи и их роль в прогнозе карстовой опасности. Инженерная геология, № 6, с. 4–17.
17. Galve J.P., Gutierrez F., Lucha P., Guerrero J., Bonachea J., Remondo J., Cendrero A., 2009. Probabilistic sinkhole modeling for hazard assessment. Earth Surface Processes and Landforms, No. 34, pp. 437–452.
18. Long Jia, Yan Meng, Zhen-de Guan, Li-peng Liu, 2015. Numerical simulation of karst soil cave evolution. 14th Sinkhole Conference. NCKRI Symposium 5, 2015, pp. 493–500.
19. Tao X., M. Ye, D. Wang, X. Wang, J. Zhao, R.P. Castro, 2014. Experimental investigation of catastrophic cover-collapse sinkhole formation. AGU Fall Meeting Abstracts., December 15–19, 2014, San Francisco, CA.
20. Scherbakov S.V., 2013. Modern approach to an assessment of karst hazard. Global View of Engineering Geology and the Environment. Proceeding of the International Symposium and 9th Asian Regional Conference of IAEG, Beijing, 2013, pp. 867–872.
21. Shcherbakov S., Drobinina E., 2016. Influence of deformation and strength properties of covering soil on karst activity. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016), 2016, Book 1, Vol. 1, Part A, pp. 863–870.

REFERENCES

1. Aderhold G., 2010. Classification of failures and settling sediments in the karstopasnyh areas of Hesse. Recommendations for the evaluation of geotechnical risks during construction activities, in E.V. Kuposova (ed.), translated from German by V.V. Tolmacheva, NNGASU, Nizhny Novgorod. (in Russian)
2. Andreychuk V.N., Dorofeev E.P., Lukin V.S., 1990. Organ tubes in carbonate-sulfate roof of caves. Caves. Problems of study, Vol. 22, pp. 16–23. (in Russian)
3. Andreychuk V.N., 1990. Sinkholes under gypsum caves-labyrinths and estimation of sustainability of karst territories. Prut, Chernovtsy. (in Russian)
4. Anikeev A.V., 2017. Sinkholes and subsidence craters in karst areas: mechanisms of occurrence, forecast and risk estimation. RUDN, Moscow. (in Russian)
5. Erofeev E.A., Kataev V.N., 2010. Using probabilistic and statistical methods for estimating karst hazards under conditions of anthropogenic influence on karst areas. Engineering Geology, No. 4, pp. 34–46. (in Russian)
6. Erofeev E.A., Kataev V.N., 2017. Identification of surface karst forms on satellite data. Geology and mineral resources of Western Ural, Materials of the 37th All-Russian scientific-practical conference with International participation, Perm, 2017, pp. 193–197. (in Russian)
7. Ziangirov R.S., Mironov N.A., Pendin V.V., 1986. Application of multidimensional correlation-regression analysis for estimation and forecast sustainability of karst territory. Engineering Geology, No. 3, pp. 55–64. (in Russian)
8. Kataev V.N., Kovaleva T.G., 2013. Role of the expert estimation in the karst forecast. Fundamental Research, No. 8, pp. 1130–1135. (in Russian)
9. Neschetkin O.B., 2017. Sinkholes development model. Part 1. Modeling. Engineering Geology, No. 5, pp. 40–51. (in Russian)
10. Tolmachev V.V., Troitsky G.M., Khomenko V.P., 1986. Engineering and construction development of karst territories. Stroyizdat, Moscow. (in Russian)
11. Tolmachev V.V., Roiter F., 1990. Karst engineering. Nedra, Moscow. (in Russian)
12. Khomenko V.P., 2003. Regularities and forecasting of suffusion. GEOS, Moscow. (in Russian)
13. Khomenko V.P., 2015. Collapse sinkholes formation: mechanisms and hazard assessments. Environmental safety and construction in karst areas, Proceedings of the International Symposium, Perm, 2015, pp. 50–60. (in Russian)
14. Scherbakov S.V., Kataev V.N., 2011. Integral estimation of karst hazard on the urbanized territories (on example of Kungur city). Scientific notes of Kazan University. Natural sciences, Vol. 157, Book 1, pp. 203–224. (in Russian)
15. Shcherbakov S.V., Kataev V.N., 2013. Towards assessment of morphometric characteristics of karst forms. Engineering Geology, No. 1, pp. 56–64. (in Russian)
16. Shcherbakov S.V., Kataev V.N., 2016. Influence of mechanical features of covering disperse soils on the prognosis of the karst hazard. Engineering Geology, No. 6, pp. 4–17. (in Russian)
17. Galve J.P., Gutierrez F., Lucha P., Guerrero J., Bonachea J., Remondo J., Cendrero A., 2009. Probabilistic sinkhole modeling for hazard assessment. Earth Surface Processes and Landforms, No. 34, pp. 437–452.

18. Long Jia, Yan Meng, Zhen-de Guan, Li-peng Liu, 2015. Numerical simulation of karst soil cave evolution. 14th Sinkhole Conference. NCKRI Symposium 5, 2015, pp. 493–500.
19. Tao X., M. Ye, D. Wang, X. Wang, J. Zhao, R.P. Castro, 2014. Experimental investigation of catastrophic cover-collapse sinkhole formation. AGU Fall Meeting Abstracts., December 15–19, 2014, San Francisco, CA.
20. Scherbakov S.V., 2013. Modern approach to an assessment of karst hazard. Global View of Engineering Geology and the Environment. Proceeding of the International symposium and 9th Asian Regional conference of IAEG, Beijing, 2013, pp. 867–872.
21. Shcherbakov S., Drobinina E., 2016. Influence of deformation and strength properties of covering soil on karst activity. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016), 2016, Book 1, Vol. 1, Part A, pp. 863–870.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЩЕРБАКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Руководитель научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, к.г.-м.н., г. Пермь, Россия; старший научный сотрудник ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия

КАТАЕВ ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

Декан геологического факультета, заведующий кафедрой динамической геологии и гидрогеологии, научный руководитель научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, д.г.-м.н., профессор, г. Пермь, Россия

ЗОЛОТАРЕВ ДЕНИС РАФАИЛОВИЧ

Ведущий научный сотрудник научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, к.г.-м.н., г. Пермь, Россия; старший научный сотрудник ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия

КОВАЛЕВА ТАТЬЯНА ГЕННАДЬЕВНА

Доцент кафедр динамической геологии и гидрогеологии, инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного национального исследовательского университета, к.г.-м.н., г. Пермь, Россия; научный сотрудник ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SERGEY V. SHCHERBAKOV

Head of the Scientific Laboratory of Prognostic Modeling in Geosystems, Perm State National Research University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Perm, Russia; Senior research scientist of "Karst and Bank Protection" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia

VALERY N. KATAEV

Dean of the Faculty of Geology, Head of the Department of Dynamic Geology and Hydrogeology, Scientific supervisor of the Scientific Laboratory of Prognostic Modeling in Geosystems, Perm State National Research University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), professor, Perm, Russia

DENIS R. ZOLOTAREV

Leading research scientist of the Scientific Laboratory of Prognostic Modeling in Geosystems, Perm State National Research University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Perm, Russia; Senior research scientist of "Karst and Bank Protection" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia

TATYANA G. KOVALEVA

Associate professor of the Departments of Dynamic Geology and Hydrogeology, Engineering Geology and Mineral Protection, Perm State National Research University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Perm, Russia; Research scientist of "Karst and Bank Protection" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia



Фото С.В. Щербакова