

ISSN 1993-5056 (Print)
ISSN 2587-8247 (Online)

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

• Vol. XIX • Том XIX • 2/2024 •

ENGINEERING GEOLOGY WORLD

При поддержке:



Саморегулируемая организация



Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве» —
Общероссийское отраслевое
объединение работодателей



ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Международный научный журнал

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издаётся с мая 2006 г.
Выходит 4 раза в год.

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online)
Префикс DOI: 10.25296

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов в различных отраслях инженерной и экологической геологии. Основные темы — история, теория и методология инженерной и экологической геологии, грунтоведение, инженерная геодинамика, региональная инженерная геология, механика грунтов, техническая мелиорация грунтов, инженерная геология криолитозоны, гидрогеологические исследования, инженерная геофизика, сохранение памятников культуры и многие другие вопросы.

УЧРЕДИТЕЛЬ

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

РЕДАКЦИЯ

Богданова Наталья Дмитриевна
Генеральный директор

Лысенкова Екатерина Александровна
Литературный редактор

Кашкина Марина Сергеевна
Отдел рекламы и отдел подписки

АДРЕС РЕДАКЦИИ

ООО «Геомаркетинг»
115088, РФ, Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5
Тел. +7 495 210-63-90
E-mail: info@geomark.ru
http://geomark.ru

ИП Гилманов М.А.
Допечатная подготовка, дизайн и верстка

ТИПОГРАФИЯ

ООО «Вива-Стар», 107023, РФ, Москва,
ул. Электrozаводская, д. 20

Свидетельство о регистрации средства массовой информации:
ПИ № ФС77-48918 от 12 марта 2012 г.

Подписка может быть оформлена в редакции, через ГК «Урал-Пресс»,
ООО «Агентство «Книга-Сервис»», ООО «Прессинформ»
(подписной индекс 38889).

Электронная версия: www.geomark.ru/our_journal/inzhenernaya-geologiya/
https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28249

Подписано в печать 30.06.2024.

Формат издания 50x70/8. Бумага матовая. Печать офсетная.

Тираж 1 500 экз.

В статьях представлена точка зрения авторов, которая может не совпадать с мнением редакции журнала.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

© ООО «Геомаркетинг», 2024

Фото на обложке Р.Р. Хайруллина с беспилотного летательного аппарата. Литотоп плоскобугристого торфяного массива с развитием бугров в результате термоэрозии по повторно-жильным льдам, Пур-Тазовское междуречье

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Бажутин П.И., Щербаков С.В.

**Определение возможных сценариев
провалообразования и прогнозирование диаметра
карстовых провалов**

6

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Галкин А.Н., Королев В.А.

**Особенности эколого-геологических систем
массивов скальных грунтов на территории
Белоруссии**

18

Королев В.А., Родькина И.А.

**Эколого-геологические системы массивов грунтов,
загрязненных различными компонентами**

32

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т.

**Плоско- и выпуклобугристые торфяные массивы
и особенности эколого-геологических систем
в их границах**

48

Наумов М.А., Фоменко И.К., Горобцов Д.Н.

**Математическое моделирование глубины
оттаивания грунтов от воздействия воды
в пруду-накопителе**

64

ПРИЛОЖЕНИЕ

Лаврусевич А.А.

Актуальный учебник по инженерной геодинамике

76

КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ

Трофимов В.Т., Балыкова С.Д., Андреева Т.В., Ершова А.В.

**Просадочность грунтов погребенных почв
циклично построенных толщ лессовых пород
Северной Евразии**

78

Комаров И.А., Мироненко М.В., Никитин К.А., Кияшко Н.В.

**Методика прогноза температурного и
водно-ионного режима засоленных мерзлых
пород полуострова Ямал с учетом глобального
изменения климата**

78

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

- | | |
|---|---|
| 1.6.1. Общая и региональная геология. | 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки); |
| Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки); | 1.6.9. Геофизика (физико-математические науки); |
| 1.6.6. Гидрогеология (геолого-минералогические науки); | 1.6.9. Геофизика (технические науки); |
| 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки); | 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки); |
| 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (географические науки); | 1.6.21. Геоэкология (технические науки); |
| 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки); | 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки); |
| 1.6.8. Гляциология и криология Земли (географические науки); | 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки); |
| | 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки). |

ENGINEERING GEODYNAMICS

Bazhutin P.I., Shcherbakov S.V.

Identification of possible karst collapse scenarios and prediction of karst sinkhole diameter

ECOLOGICAL GEOLOGY

Galkin A.N., Korolev V.A.

Features of ecological-geological systems of rock massifs in Belarus

Korolev V.A., Rodkina I.A.

Ecological-geological systems of contaminated soil masses

ENGINEERING GEOLOGY OF PERMAFROST

Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T.

High-centered polygonal peatlands and palsa, along with the features of ecological-geological systems inside their boundaries

Naumov M.A., Fomenko I.K., Gorobtsov D.N.

Mathematical modeling of the soil thawing depth due to the water impact in the storage pond

SUPPLEMENT

Lavrusevich A.A.

Current textbook on engineering geodynamics

BOOK REVIEW

Trofimov V.T., Balykova S.D., Andreeva T.V., Ershova A.V.

Subsidence of buried soil of cyclic loess sequences in the Northern Eurasia

Komarov I.A., Mironenko M.V., Nikitin K.A., Kiyashko N.V.

Methodology for forecasting the temperature and water-ion regime of saline frozen rocks on the Yamal Peninsula, considering global climate change



Cover photo by R.R. Khairullin from an unmanned aerial vehicle. Lithotope of a high-centered polygonal peatland with the developed hummocks as a result of thermal erosion along ice wedges, Pur-Taz interfluvium

ENGINEERING GEOLOGY WORLD

International scientific journal

The journal is included in the Russian List of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science and Doctor of Science.

Published since May 2006.

Issued 4 times a year.

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online)

Prefix DOI: 10.25296

18

The journal publishes articles of leading experts in the field of engineering and ecological geology. The main topics are history, theory and methodology of engineering and ecological geology, soil science, engineering geodynamics, regional engineering geology, soil mechanics, technical melioration of soils, engineering geology of cryolithozones, hydrogeological investigations, engineering geophysics, preservation of cultural monuments and many other issues.

32

FOUNDER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

PUBLISHER

48

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

JOURNAL EDITORING

64

Natalia D. Bogdanova
General Director

Ekaterina A. Lysenkova
Literary Editor

76

Marina S. Kashkina

Advertising Department and Subscription Department

CONTACTS

Geomarketing LLC
115088, Russian Federation, Moscow,
Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5
Tel. +7 495 210-63-90
E-mail: info@geomark.ru
<http://geomark.ru>

78

Individual entrepreneur Gilmanov M.A.
Prepress, Design and Layout

PRINTING HOUSE

78

Vivastar LLC; 20 Electroavodskaya St.,
Moscow, 107023, Russian Federation (RF)

Certificate of registration of mass media: PI № Ф077-48918 12 March 2012.

Subscription can be issued in the editorial board, through Ural-Press Group of Companies, "Kniga-Service" Agency LLC, and Pressinform LLC (subscription index 38889).

Electronic version: www.geomark.ru/our_journal/inzhenernaya-geologiya/

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28249

Signed in print 30 June 2024.

Edition format 50x70/8. Matte paper. Offset printing.

Edition 1 500 psc.

The article presents the authors' point of view, which may not coincide with the opinion of the editorial board.

The editorial board is not responsible for the content of advertising materials.

© Geomarketing LLC, 2024

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИАМЕТРА КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ



Фото П.И. Бажутина

БАЖУТИН П.И.*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, pavel.bazhutin.96@mail.ru

Адрес: ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия

ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Москва, Россия, bazhutin@antikarst.ru

Адрес: ул. Сущевский Вал, д. 5, стр. 3, г. Москва, 127018, Россия

ЩЕРБАКОВ С.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, sherbakov.lpmg@mail.ru

ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Москва, Россия, sherbakov@antikarst.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 06.05.2024 / Принята к публикации 25.06.2024 / Дата публикации 30.06.2024

© ООО «Геомаркетинг», 2024

Аннотация

Статья посвящена проблеме определения расчетных диаметров возможных карстовых деформаций. В соответствии с требованиями нормативной документации при определении расчетных диаметров карстовых деформаций допускается применение численных и аналитических методов. Однако используемые на практике методы расчета имеют значительные допущения и не способны учесть всю сложность и многогранность существующих механизмов провалообразования. Отмечается, что нередко в естественных условиях формируются карстовые провалы, связанные с развитием в массиве трубообразных каналов, иначе называемых «органными трубами», в связи с чем имеется необходимость их учета при построении расчетных моделей. Авторами приводится методика определения расчетных диаметров карстовых деформаций, позволяющая в зависимости от геологического строения выполнять расчет с учетом различных механизмов образования провалов: карстово-обвальных, карстово-суффозионных, смешанных или карстово-суффозионно-обвальных, а также по типу трубообразного канала. При этом в расчетной методике предусмотрено выполнение не единичного расчета и получение одной итоговой величины диаметра карстовой деформации, а множественные вычисления диаметра по одной литологической колонке скважины, служащей основой выполнения расчетов. В статье приводятся результаты апробирования данной методики в пределах наиболее интенсивно закарстованного участка автомобильной дороги М-12 «Казань — Екатеринбург», расположенного в юго-восточной части Пермского края. Установлено, что рассматриваемая методика прогнозирования диаметров и механизмов образования карстовых провалов способствуют повышению эффективности расчетных методов ввиду возможности определения наиболее вероятного механизма образования провалов, а также выполнения верификации прогнозных значений фактическими данными.

Ключевые слова:

карстовая деформация; расчетный диаметр; механизм провалообразования; аналитические методы расчета; трубообразные каналы; «органные трубы»

Ссылка для цитирования:

Бажутин П.И., Щербаков С.В., 2024. Определение возможных сценариев провалообразования и прогнозирование диаметра карстовых провалов. Инженерная геология, Том XIX, № 2, с. 6–16, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2024-19-2-6-16>.

IDENTIFICATION OF POSSIBLE KARST COLLAPSE SCENARIOS AND PREDICTION OF KARST SINKHOLE DIAMETER

PAVEL I. BAZHUTIN*

Perm State National Research University; Perm, Russia; pavel.bazhutin.96@mail.ru

Address: Bld. 15, Bukireva St., 614990, Perm, Russia

Karst and Bank Protection LLC; Moscow, Russia; bazhutin@antikarst.ru

Address: Bld. 5, Pde 3, Suschevsky Val St., 127018, Moscow, Russia

SERGEY V. SHCHERBAKOV

Perm State National Research University; Perm, Russia; sherbakov.lpmg@mail.ru

Karst and Bank Protection LLC; Moscow, Russia; sherbakov@antikarst.ru

Original paper

Received 6 May 2024 / Accepted 25 June 2024 / Published 30 June 2024

© Geomarketing LLC, 2024

Abstract

The paper focuses on the challenge of determining the calculated diameters of potential karst deformations. According to the requirements of the regulatory documents, both numerical and analytical techniques can be employed to determine the calculated diameters of potential karst deformations. However, the calculation methods used in practice make significant assumptions and are not able to take into account the complexity and multifaceted nature of the mechanisms that lead to karst collapse. The study notes that karst sinkholes are often formed under natural conditions due to the development of pipe-shaped channels in the massif, which are known as “organ pipes”. Therefore, it is necessary to take them into account when developing calculation models. The authors present a method for determining the calculated diameter of karst deformation, which allows, depending on the geological structure, to perform calculations considering the different mechanisms of karst sinkhole formation: karst-collapse, karst-suffosion, and karst-suffosion-collapse, as well as the type of pipe-shaped channel. In this case, the calculation method involves not just one calculation to obtain a final value for the karst deformation diameter. Instead, it involves multiple calculations of the diameter for a lithological column of the calculated borehole. The paper presents the results of testing this methodology on the most intensely karstified section of the M-12 “Kazan — Yekaterinburg” highway, located in the southeastern part of the Perm Region. It has been established that the methodology considered for predicting the diameters and mechanisms of karst sinkhole formation contributes to increasing the efficiency of calculation methods. This is due to the ability to determine the most likely collapse mechanism and the possibility of verifying forecast values with actual data.

Key words:

karst deformation; calculated diameter; karst collapse mechanism; analytical calculation methods; pipe-shaped channels; “organ pipes”

For citation:

Bazhutin P.I., Shcherbakov S.V., 2024. Identification of possible karst collapse scenarios and prediction of karst sinkhole diameter. *Engineering Geology World*, Vol. XIX, No. 2, pp. 6–16, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2024-19-2-6-16>.

Введение

На современном этапе нормативная документация, регулирующая проведение инженерно-геологических изысканий в карстовых районах в части определения диаметров возможных карстовых деформаций, допускает применение численных и аналитических методов (п. 6.12.12 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» (изменение № 6)), но опубликовано крайне мало работ, посвященных этой тематике, в связи с чем довольно сложно оценить эффективность использования того или иного методического подхода.

В основе численных методов лежат расчеты с применением компьютерного моделирования. Результатом численных решений являются модельные карты-поля, отражающие распространение напряжений в грунтовом массиве, изменения абсолютных и относительных вертикальных, горизонтальных и объемных деформаций грунтовой толщи и ряд других параметров. Такие модели позволяют

оценивать поведение и изменение положения грунтов над карстовой полостью, а дальнейшая их интерпретация и прогнозирование развития зоны деформирования выше по инженерно-геологическому разрезу позволяют с той или иной достоверностью судить о ее типе и параметрах (в случае если зона распространяется до поверхности земли). Если же зона перераспределения напряжений в грунтовом массиве над карстовой полостью не достигает дневной поверхности, то это не означает, что в данной точке образование карстового провала невозможно. В природе механизм образования поверхностных форм карста нередко связан с формированием промежуточных полостей [4, 20]. В связи с этим для получения результата, наиболее приближенного к истинному, необходимо экспертно определять положение возможных промежуточных полостей (в зоне затухания деформаций грунта, на границах уровня подземных вод и между грунтовыми элементами и т.д.). Данная проблема дополнительно осложняется необходимостью определения высоты и диаметра такой полости.

Несмотря на учет размера и положения промежуточных полостей, следует отметить, что метод численного компьютерного моделирования не позволяет принимать во внимание аккумуляционную емкость массива, во многом определяющую возможность выхода карстовой деформации на поверхность [5, 10]. Если массив растворимых толщ имеет малую аккумуляционную емкость и способен принять незначительный объем вышележащих отложений, процесс ограничится только разуплотнением грунтовой толщи без поверхностного карстопроявления.

В случаях, когда массив карстующихся отложений с поверхности перекрыт несвязными песчаными грунтами, помимо классического перераспределения напряжений над ослабленной зоной (полостью) и, как следствие, деформирования песчаной толщи, дополнительно следует учитывать возможность суффозионного истечения песков под действием гравитационных и (или) гидравлических сил. Корректная оценка влияния суффозии в численных моделях на современном этапе развития программных продуктов по-прежнему не представляется возможной.

С учетом вышеуказанных особенностей, применение метода численного компьютерного моделирования наиболее целесообразно в условиях неглубокого залегания карстующегося массива, перекрытого с поверхности связными и полускальными грунтами.

При рассмотрении аналитических (детерминистических) методов расчета целесообразно отметить, что большинство существующих подходов является различными модификациями модели смещения грунта по круглоцилиндрической поверхности, иначе называемой моделью А. Бирбаумера [6]. Как отмечал В.Н. Огоноченко [13], применение данной расчетной схемы имеет ряд допущений и граничных условий:

- 1) провал реализуется в виде вертикального смещения грунтового столба;
- 2) пролеты ослабленного участка и провала совпадают;
- 3) перемещающийся цилиндр грунта не деформируется;
- 4) сдвигающей силой служит вес грунтов в объеме цилиндрического блока;
- 5) сопротивление сдвигу мобилизуется на боковой поверхности цилиндра.

По мнению А.В. Аникеева [4], наиболее серьезными являются третье и пятое предположения. Однако по наблюдениям авторов данной статьи, к наиболее весомым допущениям также следует отнести первый и второй пункты.

При натурных наблюдениях в карстовых пещерах нередко фиксируются трубообразные каналы, иначе именуемые «органными трубами». Они формируются путем длительного растворения и (или) выщелачивания скальных грунтов и последующего выноса через канал перекрывающих дисперсных грунтов. При этом вынос последних происходит не в результате одномоментного смещения, а в процессе последовательных и сменяющихся серий вывалов и суффозии грунтов под действием гравитационных сил и фильтрующей воды. Такие явления приводят к тому, что трубообразные каналы зачастую находят свое продолжение в толще перекрывающих дисперсных отложений и развиваются вплоть до поверхности земли, где проявляются в форме карстово-суффозионных провалов, нередко с видимыми понорами в их днище. Наконец, формирование «органных труб» также примечательно тем, что закладываются они, как правило, внутри массива над

крупными карстовыми полостями (гротами), размеры которых значительно превышают диаметры провалов, образующихся на поверхности земли.

По результатам лабораторного моделирования разрушения связных грунтов над полым пространством, отмечено, что нередко в них формируются трещины отрыва на краях полости. Замыкаясь внутри слоя грунта, эти трещины образуют свод обрушения [3]. Вычислить высоту параболического свода обрушения можно с помощью математического решения, предложенного М.М. Протодяконовым [15, 20]. Данная модель разрушения связных грунтов наиболее достоверно отражает механизм образования провалов.

Несмотря на то, что на современном этапе в карстологической практике насчитывается несколько десятков различных аналитических методов расчета карстовых деформаций, их граничные условия и прогнозная точность являются не до конца определенными. Так, применимость и точность различных расчетных аналитических решений ранее рассматривалась в публикациях М.М. Уткина [19], Д.Р. Золотарева и И.И. Капатской [8], которые указывали на весьма завышенные значения итоговых расчетных параметров карстовых деформаций. С другой стороны, В.П. Хоменко [21] в своей работе приводит результат апробирования собственного подхода на примере Пивоваровского провала во Владимирской области, согласно которому полученный результат оказался идентичным диаметру провала, произошедшему в природе. Следует отметить, что данный расчет выполнен с некоторыми допущениями: вся перекрывающая толща представлена глинистыми отложениями татарского яруса верхней перми; при этом она однородна, а ее физико-механические свойства постоянны по всей мощности и являются идентичными свойствам грунтов г. Дзержинска примерно того же возраста. Еще один пример высокой сходимости аналитических расчетов с натурными данными приводится в монографии А.В. Аникеева [4], в которой автором спрогнозированы диаметры провалов для восточной части г. Дзержинска. Впоследствии данные расчеты были подтверждены в этом же районе с высокой степенью сходимости на примере образования нового карстового провала.

В целом, изложенные особенности численных и аналитических решений, а также примеры их практического применения позволяют отметить общую тенденцию: аналитические методы прогноза, основанные не только на прямых закономерностях, но и на некоторых субъективных параметрах (учет вероятностного механизма провалообразования, возможного размера карстовой полости, аккумуляционной емкости массива и др.), на данном этапе их проработки характеризуются большей прогностической точностью и однозначностью получаемых результатов в сравнении с численными решениями. Одновременно с этим точность карстологического прогноза будет ограничена до тех пор, пока нет однозначного представления о доминирующем механизме образования карстовых деформаций в конкретных инженерно-геологических условиях. Кроме того, любая расчетная модель базируется на схематизации инженерно-геологических условий, а ввиду их сложности и многокомпонентности схематизация может выполняться со значительными допущениями. Таким образом, расчетная модель изначально может быть основана на данных, не отражающих природную обстановку.

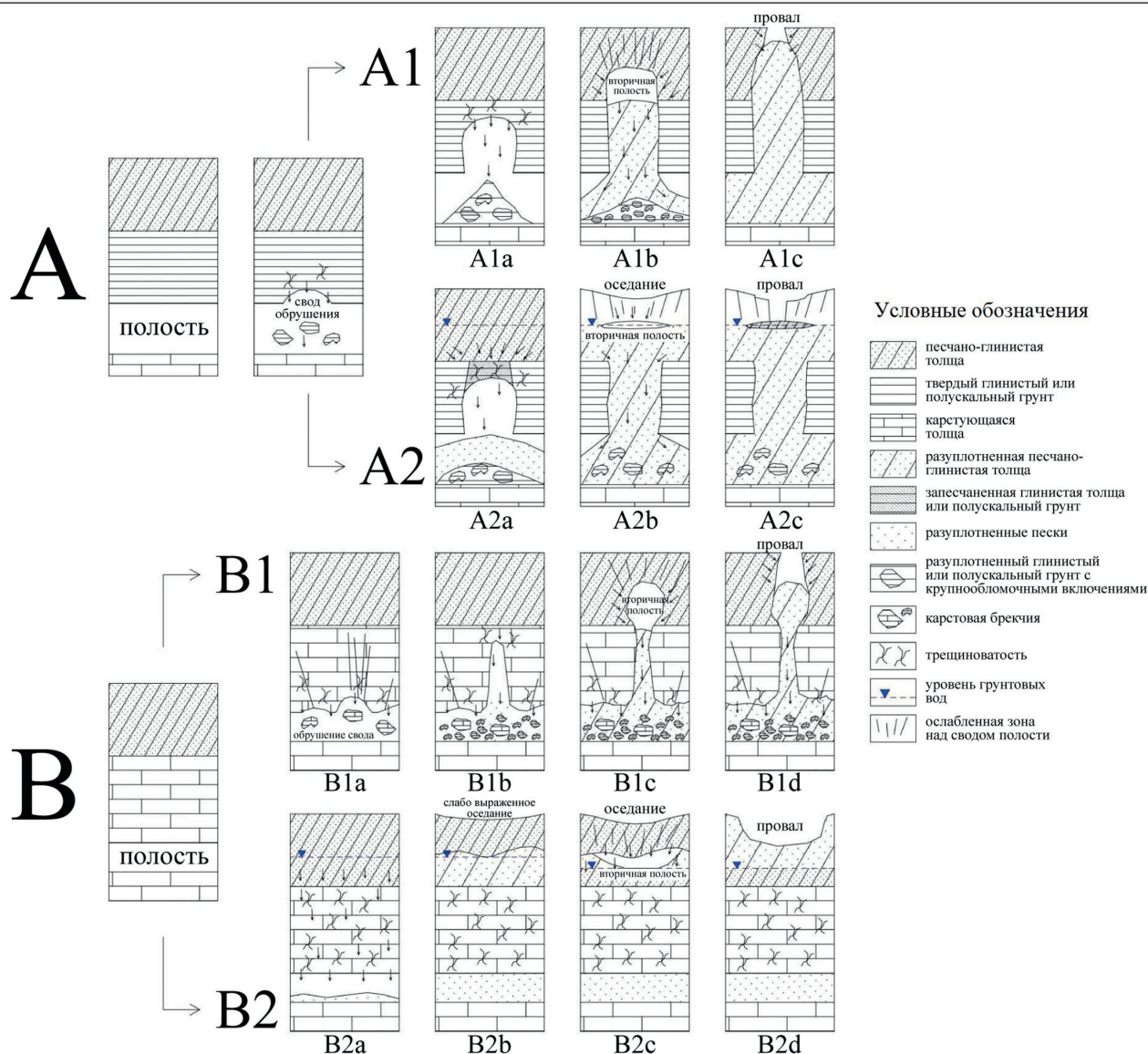


Рис. 1. Концептуальные схемы формирования поверхностных карстовых деформаций (по [23] с изменениями).

Обозначения: А — формирование провалов в условиях залегания полости в некарстующихся отложениях.

A1 — карстово-обвальный провал; формирование: **A1a** — свод обрушения; **A1b** — вторичная карстовая полость;

A1c — карстово-обвальный провал. **A2** — карстово-суффозионно-обвальный провал; формирование: **A2a** — свод

обрушения с активизацией суффозионного процесса; **A2b** — локальная просадочная мульда (оседание) на

поверхности земли, в случае интенсивного суффозионного выноса возможно формирование вторичных полостей;

A2c — карстово-суффозионно-обвальный провал, появление возможно в случае интенсивного суффозионного

выноса. **В** — формирование провалов в условиях залегания полости в толще карстующихся отложений.

B1 — карстово-обвальный провал; **B1a** — начальная стадия растворения грунтов в бортах системных

субвертикальных трещин; **B1b** — увеличение вертикальных размеров полостей по направлению к поверхности;

формирование: **B1c** — вторичной карстовой полости в толще перекрывающих отложений; **B1d** — карстово-

обвального провала. **B2** — карстово-суффозионно-обвальный провал; **B2a** — активизация суффозионного процесса

с выносом частиц в крупный карстовый коллектор; формирование: **B2b** — слабовыраженное оседание на

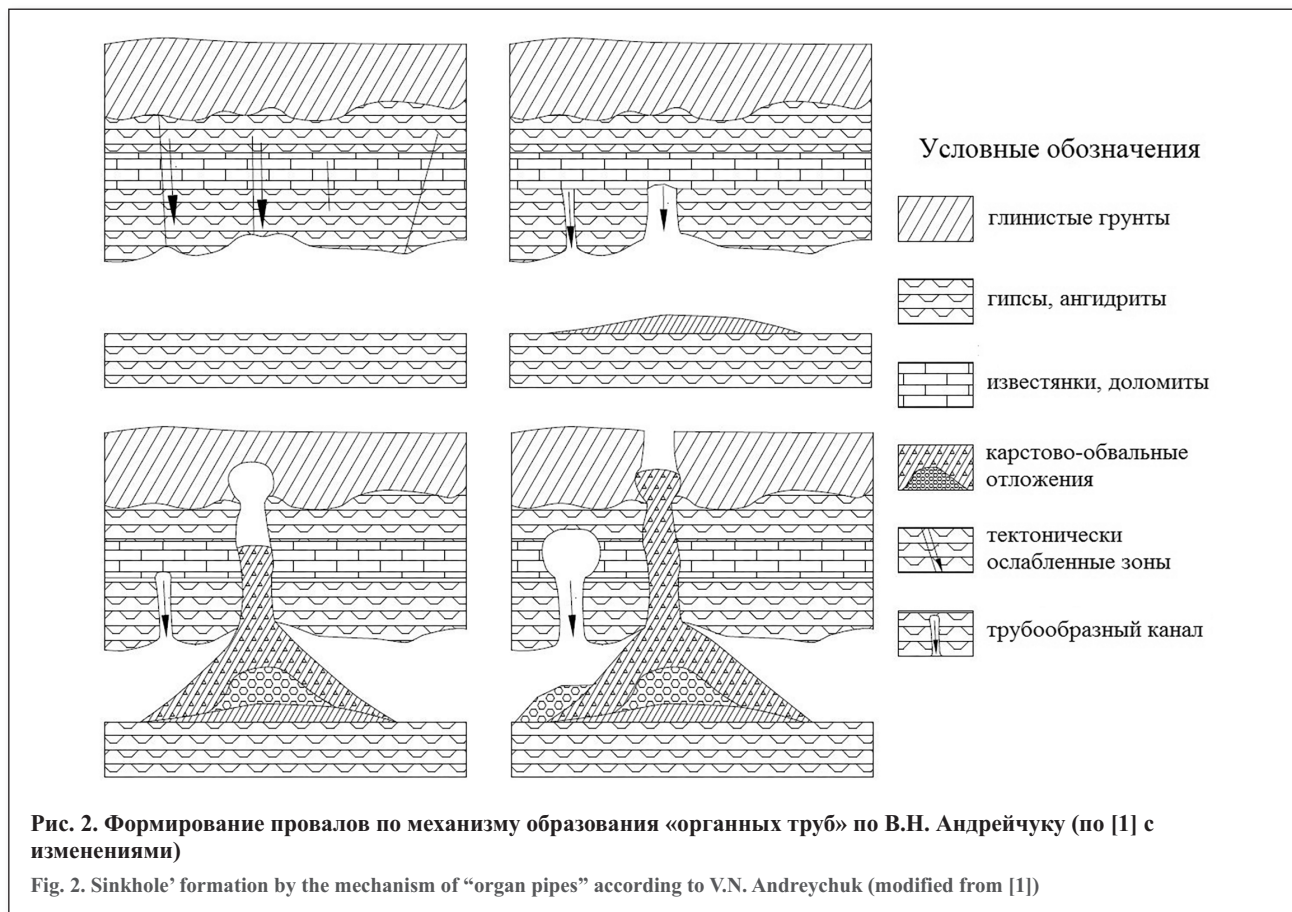
поверхности земли; **B2c** — вторичной карстовой полости в толще перекрывающих отложений, появление возможно

в случае интенсивного суффозионного выноса; **B2d** — карстово-суффозионно-обвального провала, появление

возможно в случае интенсивного суффозионного выноса и значительной аккумуляционной емкости карстового

коллектора

Fig. 1. Conceptual schemes of the formation of surface karst deformations (modified from [23]). **Designations:** A — sinkholes' formation, when cavity is in non-karstified sediments. **A1** — karst-collapse sinkhole; formation of: **A1a** — collapsing arch; **A1b** — secondary karst cavity; **A1c** — karst-collapse sinkhole. **A2** — karst-sffosion-collapse sinkhole; formation of: **A2a** — collapsing arch with activation of the suffosion process; **A2b** — local subsidence trough (subsidence) on the ground, in case of intensive suffosion outflow, it is possible the formation of secondary cavities; **A2c** — karst-sffosion-collapse sinkhole, appearance is possible in case of intensive suffosion outflow. **B** — sinkholes' formation, when cavity is in karstified sediments. **B1** — karst-collapse sinkhole; **B1a** — initial stage of rocks' dissolution in the sides of system subvertical cracks; **B1b** — increase of vertical dimensions of cavities towards the surface; formation of: **B1c** — secondary karst cavity in the overlying sediments; **B1d** — karst-collapse sinkhole. **B2** — karst-suffosion-collapse sinkhole; **B2a** — activation of the suffosion process with particles' removal into a large karst reservoir; formation of: **B2b** — slightly visible surface subsidence; **B2c** — secondary karst cavity in the overlying sediments, appearance is possible in case of intensive suffosion outflow; **B2d** — karst-suffosion-collapse sinkhole, appearance is possible in case of intensive suffosion outflow and significant accumulation capacity of karst reservoir



Механизмы образования провалов

В первом приближении можно выделить два типа деформирования грунтов над полостью: карстово-обвальный и карстово-суффозионный. Концептуальные схемы формирования поверхностных карстовых деформаций приведены на рис. 1.

Карстово-обвальный процесс может развиваться по двум сценариям:

- происходит обрушение грунта в нижележащую карстовую полость, описываемое моделями А. Бирбаумера или М.М. Протодяконова (см. рис. 1, схема А1);

- полное обрушение перекрывающих грунтов в полость не происходит, а наоборот, в их толще формируется трубообразный канал, в поперечнике намного меньший карстовой полости. Образование канала происходит постепенно в результате периодических вывалов грунта в своде карстовой полости (см. рис. 1, схема В1).

К карстово-суффозионному типу деформирования грунтов относятся случаи, когда в разрезе присутствует грунтовый слой, обрушение которого не происходит, а образуется сеть трещин, являющаяся каналами суффозионного выноса вышележащих несвязных отложений (см. рис. 1, схемы А2, В2).

Необходимо подчеркнуть, что нередко оба механизма могут проявляться одновременно в пределах квазиоднородных в инженерно-геологическом отношении участков [22].

При вычислении прогнозных диаметров провалов в условиях глинистого разреза, расчет сводится к определению способности слоя грунта удержаться над карстовой или промежуточной полостью. Для этого используются методики расчета, в основе которых лежат рассмотренные модели обрушения А. Бирбаумера и М.М. Протодяконова. В случае, если физико-механические свойства и мощность

слоя перекрывающих грунтов являются достаточными для удержания над полостью, расчет следует выполнить по второму сценарию развития провалообразования, путем формирования трубообразных каналов, иначе называемых «органными трубами». Механизм их образования приведен на рис. 2. Такие каналы, как правило, закладываются в пределах тектонически ослабленных зон — участков массива с повышенной структурной и тектонической трещиноватостью, на границах блоковых структур различного порядка. С подобными каналами зачастую связано наличие «гидрогеологических окон» — мест активного перетока и перехода поверхностного стока в подземный. Это отмечали исследователи-карстоведы еще во второй половине XX в. [2, 11, 14, 17].

В работе В.Н. Андрейчука [1] рассматривается взаимосвязь положения поверхностных карстопоявлений над карстовыми пещерами и формами их проявления внутри пещер. Автор отмечает, что большинство образовавшихся на поверхности карстовых форм располагается над «органными трубами». Наличие таких каналов характерно для гипсовых пещер Предуралья, Поволжья, территории западной Украины, реже они встречаются в карбонатных отложениях Предуралья, горно-складчатых областей п-ова Крым и Кавказа [1].

Ввиду широкого распространения «органных труб» в пределах Предуралья, их исследования выполнялись в 2006–2010 гг. в ходе крупного регионального проекта по мониторингу карстовых процессов Пермского края, в результате которого была сформирована база данных, содержащая сведения о зарегистрированных трубообразных каналах и получены определенные статистические зависимости.

Следует отметить, что вскрытие трубообразных каналов в процессе бурения скважин носит случайных харак-



Рис. 3. Принципиальная схема определения расчетного диаметра карстовой деформации: полускальные грунты — разновидности скальных грунтов, наиболее подверженных к разрушению над карстовыми полостями ввиду низких прочностных свойств; связные и несвязные грунты — подклассы дисперсных грунтов, характеризующихся принципиально различными механизмами разрушения над карстовыми полостями. Дальнейшее их разделение по генезису и физико-механическим свойствам определяет только скорость деформирования над подземными пустотами. Критический диаметр — диаметр полости, при котором произойдет обрушение грунтового слоя

Fig. 3. Principal scheme for determining the calculated diameter of karst deformation: semi-solid rocks — varieties of rocks, that are more prone to collapse above karst cavities due to low strength properties; cohesive and non-cohesive soils — subclasses of dispersed soils characterized by fundamentally different mechanisms of collapse above karst cavities. Their further division by genesis and physical and mechanical properties determines only the rate of deformation over underground cavities. Critical diameter — diameter of the cavity at which the soil will collapse

тер, а вследствие невысокой точности малоглубинных скважинных геофизических исследований отличить карстовую полость от таких каналов зачастую весьма затруднительно. Изучение «органов труб» путем прямых визуальных наблюдений в абсолютном большинстве случаев невозможно, т.к. далеко не на всех объектах имеется разветвленная сеть пещер, доступных для обследования. Все эти обстоятельства приводят к единственному выводу, согласно которому количественная оценка трубообразных каналов может быть выполнена только косвенно, посредством анализа пространственного положения и размеров поверхностных карстовых форм. По мнению авторов данной статьи, учет формирования подобных трубообразных каналов является необходимым условием при карстологическом прогнозе.

Методика исследования

Учитывая факт, что даже в пределах тех участков, инженерно-геологические условия которых считаются практически однородными (квазиоднородными), возможно формирование провалов различных по механизму их образования (карстово-обвальные, карстово-суффозионные, смешанные или карстово-суффозионно-обвальные, по типу трубообразного канала), необходимо оценить вероятность образования каждого из них, а также возможные размеры.

Авторами предлагается подход, при котором диаметр карстового провала определяется не единичным расчетом, а путем многочисленных вычислений, с изменением значений субъективных показателей и свойств грунтов в заранее заданном диапазоне значений. Принципиальная схема выполнения исследования приведена на рис. 3.

В основу алгоритма, посредством которого реализуется приведенная схема, заложена методика вычисления параметров карстово-суффозионных деформаций методом послойного аналитико-графического моделирования, разработанная авторами. Данная методика базируется на расчетных принципах и подходах, предложенных А.В. Аникеевым [4]. Далее рассмотрен алгоритм проведения расчетов.

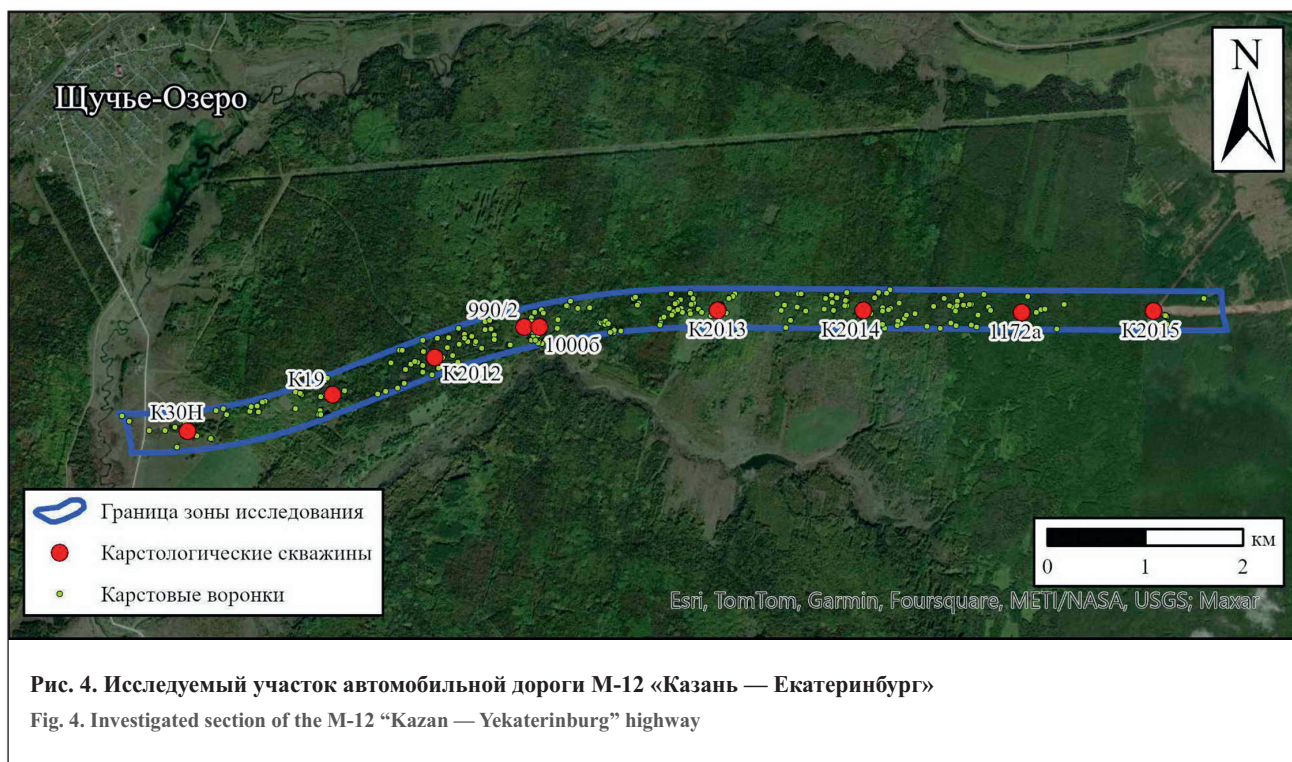
На контакте карстующихся и перекрывающих толщ предполагается наличие полости, над которой могут залежать полускальные, дисперсные (связные или несвязные) грунты. Размер полости определяется по данным бурения или геофизических исследований или же принимается «экспертно» на основе геологических условий территории. Для полускальных и дисперсных (связных) грунтов производится расчет критического диаметра полости, при котором произойдет обрушение слоя грунта, если размер полости достаточен для его обрушения, тогда механизм деформирования рассматривается согласно модели обрушения параболического свода, или иначе называемой модели М.М. Протодяконова. Если же слой грунта способен удерживаться над полостью, в таком слое принимается возможность развития трубообразного канала, диаметр D_{pipe} которого определяется по эмпирической зависимости, установленной В.Н. Катаевым и представленной в 2010 г. в отчете Пермского государственного университета «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области (2006–2010)» на основании натурных наблюдений за пещерами в Пермском крае:

$$D_{pipe} = e^{I_L} D_{fis} \frac{9,8\rho m}{c},$$

где e — коэффициент пористости, д.ед.; I_L — показатель текучести, д.ед.; ρ — плотность грунта, г/см³; m — мощность грунтового слоя, м; D_{fis} — суммарная ширина раскрытия трещин в дисперсных (связных) и полускальных грунтах, м; c — удельное сцепление, кПа.

В случае, если над полостью залегают дисперсный (несвязный) грунт, механизм его деформирования оценивается как суффозионное истечение на основе зависимостей, представленных в монографии А.В. Аникеева [4].

Дальнейшие вычисления сводятся к поочередному установлению поведения слоев грунта над полостью. Если грунтовый слой способен удержаться над подземными пустотами, то в качестве типа его разрушения рассматривается формирование трубообразного канала-полости, а для вышележащего слоя производятся очередные вычисления,



схематично показанные на рис. 3. Таким образом расчеты выполняются для каждого грунтового слоя, пока расчетная карстовая деформация не достигнет поверхности земли. Если в ходе вычислений для всех слоев литологической колонки соблюдается условие «диаметр полости равен или превышает критический диаметр», то выполненному расчету присваивается тип деформирования грунтов — карстово-обвальный. В случае, когда только один из имеющихся грунтовых слоев способен удерживаться над полостью, тогда для всего расчета по литологической колонке скважины присваивается тип деформирования грунтов, связанный с формированием трубообразного канала-полости. Учитывая пространственную изменчивость физико-механических свойств грунтов и стохастическую роль параметров закарстованности в детерминистических расчетах, такие вычисления производятся еще несколько тысяч раз при случайном изменении входных параметров (размер карстовой полости, физико-механические свойства грунтов, ширина возможного трубообразного канала и аккумуляционная емкость массива) в заранее определенном интервале значений. Результатом выполненных расчетов является выборка из нескольких тысяч значений возможного диаметра карстового провала с определением типа провалообразования для каждого конкретного случая. Данный метод расчета подробно изложен в статье [7].

Таким образом, при наличии объемной выборки с результатами определения типа образования провалов и их расчетными размерами, а также при наличии карстовых форм на поверхности земли, появляется возможность оценить достоверность прогнозной модели. Если при построении графиков распределения диаметров расчетных карстовых деформаций и карстовых воронок, закартированных *in situ*, их кривые имеют схожий вид, то это свидетельствует о прогнозной точности модели.

Краткая характеристика пилотного участка

Объектом исследования выбран наиболее интенсивно закарстованный участок проектируемой автомобильной

дороги М-12 «Казань — Екатеринбург», расположенный в юго-восточной части Пермского края, на расстоянии 2–3 км к юго-востоку от п. Щучье-Озеро (рис. 4). Протяженность участка составляет 11,6 км, ширина полосы исследования — 0,4 км.

Исследуемый участок характеризуется однородными инженерно-геологическими условиями на всем протяжении, что в свою очередь предопределяет относительную общность условий развития карста. В геоморфологическом отношении участок располагается в водораздельной части рек Атер и Алмаз. Абсолютные отметки рельефа в среднем изменяются от 230 до 250 м, в долинах рек снижаясь до 200 м. В структурно-тектоническом отношении участок приурочен к восточному крылу единой приподнятой тектонической структуры — Башкирского свода. Данные условия определили характер трещиноватости карстующейся толщи, положение трещин в массиве, состав покровных отложений и, в целом, высокую степень закарстованности исследуемого участка.

Согласно карстологическому районированию Пермского края, участок исследования расположен в пределах Иренского карстового района, который характеризуется сульфатным типом карста [12]. В результате рекогносцировочного обследования в пределах исследуемого участка площадью 4,6 км² были зафиксированы 352 различных карстопроявления, среди которых 248 являются воронками. Основным показателем поверхностной закарстованности территории — интенсивность провалообразования, которая в пределах данного участка составляет 0,77 шт./км²·год, что соответствует II категории устойчивости [16].

Ввиду высокой степени закарстованности участка, при проведении инженерных изысканий была принята определенная сеть бурения карстологических скважин, что позволило подробно изучить инженерно-геологический разрез. В настоящем анализе при моделировании провалообразования учитывались колонки девяти карстологических скважин, расположенных с шагом 1,0–2,0 км

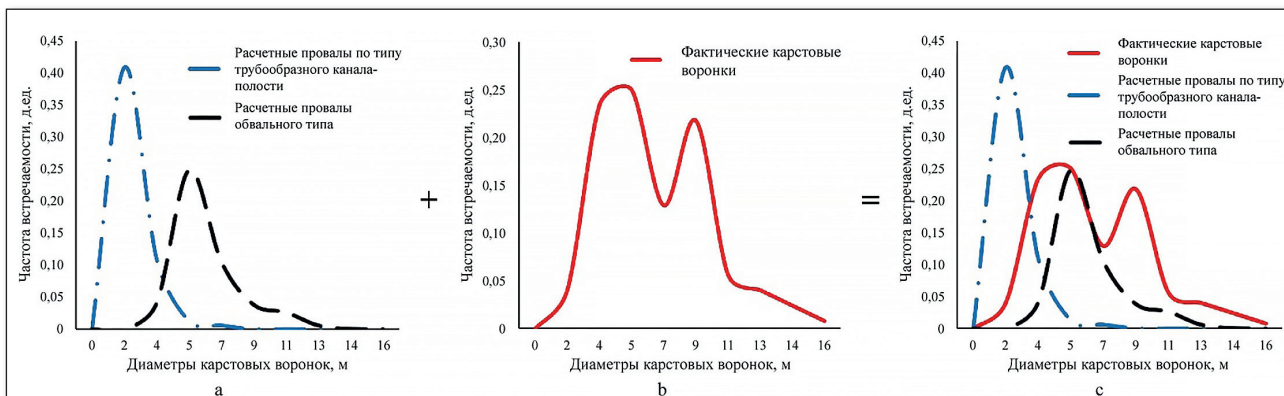


Рис. 5. Кривые распределения расчетных (а) и фактических (б) диаметров карстовых воронок и их совмещенный график (с)

Fig. 5. Distribution curves of calculated (a) and actual (b) funnels' diameters and combined graph of their distribution (c)

(см. рис. 4). В геологическом строении разреза принимают участие отложения кунгурского яруса пермской системы P_1k , представленные ангидритами, гипсами и карбонатными образованиями (часто переслаивающимися). В кровле данные отложения зачастую выветрелые до состояния щебня и муки eP_1 . С поверхности дочетвертичные накопления перекрываются аллювиально-делювиальными глинистыми грунтами четвертичного возраста a,dQ . Карстовые полости встречены практически во всех скважинах на глубинах от 10 до 35 м, высота пустот изменяется от 0,2 до 3,5 м. В литологическом отношении полости приурочены к выветрелым карстующимся отложениям кунгурского яруса пермской системы P_1k и характеризуются, в соответствии с Таблицами Б.1 и Б.5 ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация», как скальные грунты от пониженной до очень низкой прочности, размягчаемые в воде.

Гидрогеологические условия исследуемого участка характеризуются наличием двух водоносных горизонтов:

- четвертичный грунтовый водоносный горизонт;
- трещинно-карстовый водоносный горизонт нижнепермских отложений.

Наибольшую роль в протекании карстового процесса играют трещинно-карстовые воды. Практически во всех скважинах данный горизонт подземных вод вскрыт в кровле отложений кунгурского яруса пермской системы P_1k и только в некоторых случаях зафиксирован в толще элювиальных грунтов eP_1 — продуктов выветривания образований пермского возраста. Глубина залегания трещинно-карстовых вод изменяется от 10 до 25 м. Отложения кунгурского яруса отличаются значительной степенью трещиноватости и водоносны практически по всей мощности толщи. Водоупорным слоем является туйская карбонатная пачка, залегающая на глубинах 60–100 м. Водоносный горизонт — с незначительным напором от 0,5 до 5,0 м. По данным химических анализов трещинно-карстовых вод, установлена их агрессивность по отношению к сульфатным грунтам, что указывает на наличие «гидрогеологических окон» и активный обмен с водами грунтового водоносного горизонта.

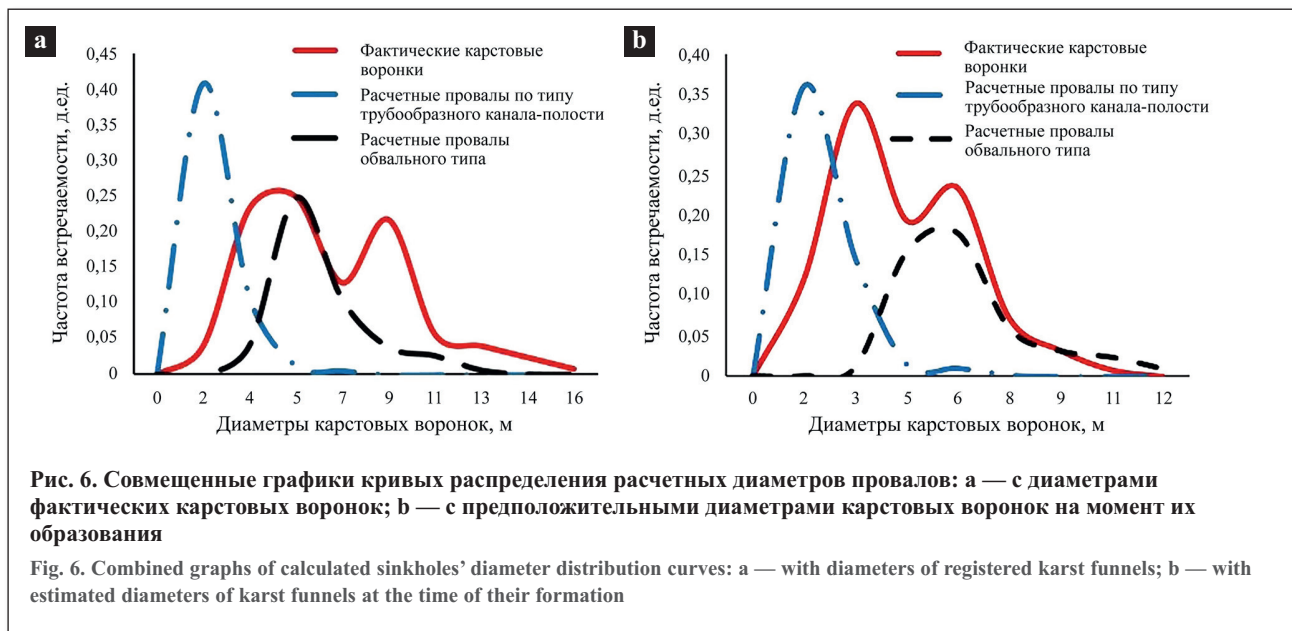
При рассмотрении геологического строения участка выявлено, что для него характерен покрытый тип карста. Дополнительно отмечается, что в условиях покрытого карста при проведении большинства карстологических расчетов диаметры потенциальных карстовых провалов

вычисляются по схемам А. Бирбаумера и М.М. Протодяконова. Образование провала возможно, если размер подземных пустот превысит критический диаметр, при котором происходит полное обрушение слоя перекрывающих грунтов. Значения расчетных диаметров карстовых деформаций, вычисленных с применением разнообразных аналитических решений, основой которых являются вышеотмеченные расчетные схемы, зачастую оказываются превышающими размер уже существующих карстовых воронок на дневной поверхности. Исходя из этого, можно предположить, что данные расчетные сценарии не учитывают возможность обрушения грунтов при меньших размерах пустот в их основании. В связи с этим имеется необходимость учета иного типа деформирования грунтов, связанного с трубообразными каналами.

Результаты исследований

Основой моделирования послужили литологические колонки девяти карстологических скважин, местоположение которых показано на рис. 4. Для каждой скважины был выполнен расчет диаметра возможного карстового провала согласно авторскому подходу. В результате многочисленных вычислений с изменением значений исходных параметров, учитывающих тип провалообразования для каждого моделируемого случая, была сформирована выборка расчетных диаметров карстовых провалов, возможных к образованию в данных условиях. Эта выборка является основой для построения графиков распределения возможных расчетных диаметров карстового провала с учетом типа деформирования грунтов. На рис. 5, а приведены графики распределения расчетных диаметров провалов, из которых следует, что большей вероятностью отличаются карстовые провалы, сформированные по типу трубообразного канала-полости. В то же время расчетные диаметры данного типа провалов являются меньшими, чем у провалов обвального типа.

Как известно, наиболее важной проблемой прогнозных моделей является вопрос их достоверности и правомерности применения. При выполнении карстологических исследований проверка прогнозных расчетов выполняется путем их сопоставления с фактически существующими карстопроявлениями. Учитывая, что карстовые формы могут быть представлены воронками, котловинами, понижениями и другими формами рельефа, характеризующимися различным возрастом и механизмами их



образования, составляется выборка морфологически схожих карстовых форм для достоверного установления количественных величин. Основой формирования такой выборки послужили следующие критерии:

- поверхностная карстовая форма определена как воронка;

- схожий вид растительности и выположенности бортов воронок, условный возраст которых согласно [16] может быть оценен как «молодые»;

- воронки локализованы в пределах территории с высотными отметками, близкими к абсолютным отметкам устьев скважин по литологическим колонкам которых выполняются расчеты (в общем случае, фиксировались воронки на удалении от скважин не более 150–200 м), что обеспечивает максимальную схожесть геолого-гидрогеологических и геоморфологических условий расчетной модели и участков, в пределах которых развиты воронки.

Результирующая выборка, удовлетворяющая вышеуказанным критериям, включает 138 воронок. Дифференциальная кривая распределения диаметров воронок приведена на рис. 5, б. Необходимо отметить, что полученное распределение характеризуется двумя ярко выраженными модами, что указывает на вероятное существование нескольких механизмов формирования карстовых воронок.

Совмещение двух кривых распределения указывает на схожесть их общего вида (см. рис. 5, с). Однако кривая расчетных провалов несколько «отстает» от кривой фактически зафиксированных воронок. Это объясняется тем фактом, что вычисление расчетного диаметра провала производится на момент его образования, без учета дальнейшего выполаживания бортов.

В работе В.В. Толмачева и Ф. Ройтера [18] отмечается, что при выполаживании бортов провалов их размер, в общем случае, увеличивается в 1,5–2,0 раза. Применив данный коэффициент к величинам диаметров существующих карстовых воронок, можно соотнести полученные расчетные диаметры карстовых провалов с предположительными диаметрами карстовых воронок на момент их образования (рис. 6).

При рассмотрении рис. 6, б следует отметить, что после использования поправочного коэффициента кривые распределения стали в значительной мере соответ-

ствовать друг другу, что указывает на правомерность применения предлагаемой расчетной модели. Анализ положения на графике кривых распределения показал, что наиболее часто на данной территории образуются провалы по типу трубообразного канала-полости, характеризующиеся средним диаметром провала на момент формирования не более 2 м.

Заключение

Разработанные алгоритм и методика определения возможных сценариев провалообразования и прогнозирования диаметра карстовых провалов способствуют повышению достоверности расчетных методов карстологического прогноза в пределах участка исследования. Повышение надежности расчетных методов связано с тем, что:

- предлагаемая прогнозная модель учитывает вероятность формирования трубообразных каналов-полостей, а также изменение их возможного диаметра в зависимости от физико-механических свойств покровных отложений;

- данный подход позволяет определить наиболее вероятный механизм образования провалов путем совмещения кривых распределения диаметров расчетных провалов и фактически зафиксированных карстовых воронок;

- из утверждения о совмещении кривых распределения также следует, что получаемый расчетный результат надежно верифицируется фактическими данными о поверхностной закарстованности. На этом основании появляется возможность оценить объективность применения расчетной модели на количественном уровне.

Применение данного прогнозного подхода предлагается в пределах территорий, характеризующихся интенсивной поверхностной закарстованностью. На участках, где поверхностные карстовые формы отсутствуют или встречаются их единичные формы, требуются иные методы прогноза. Исключением могут являться ситуации, когда природные условия развития карста в пределах конкретной площадки близки к эталонному участку, для которого уже получена информация о диаметрах расчетных и фактических карстовых форм. Заслуживает внимания предлагаемый подход по составлению аналогичных расчетных моделей с применением рассмотренной методики для целой

серии эталонных участков с типовыми условиями развития карста, характерными для различных регионов. Такие эталонные модели позволят не только дополнительно апробировать и, при необходимости, скорректировать рассмотрен-

ный в данной работе методический подход, но и смогут найти дальнейшее применение в практической деятельности при проведении инженерно-геологических изысканий и определении параметров противокарстовой защиты. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчук В.Н., 1999. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Прут, Черновцы.
2. Андрейчук В.Н., Дорофеев Е.П., Лукин В.С., 1990. Органные трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещер. В межвузовском сборнике научных трудов под ред. В.Г. Бельтюкова, К.А. Горбуновой, Пещеры. Проблемы изучения, Вып. 22. Изд-во Пермского государственного университета, Пермь, с. 16–23.
3. Аникеев А.В., 1993. О двух формах разрушения связных грунтов над полостью. Геоэкология, № 2, с. 115–123.
4. Аникеев А.В., 2017. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Изд-во РУДН, Москва.
5. Аникеев А.В., 2019. Аккумуляционная емкость растворимых пород как основной показатель устойчивости районов покрытого карста. Геоэкология, № 5, с. 3–14, <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201953-14>.
6. Бажутин П.И., 2022. Развитие расчетных методов прогнозирования карстовых и карстово-суффозионных провалов. Геология в развивающемся мире, Сборник научных трудов по материалам XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Пермь, 2022, с. 412–415.
7. Бажутин П.И., Катаев В.Н., Щербаков С.В., 2023. Стохастический учет физико-механических свойств грунтов и данных о закарстованности массива в расчетных методах прогноза параметров карстовых провалов. Вестник Пермского университета. Геология, Том 22, Вып. 2, с. 121–132, <http://dx.doi.org/10.17072/psu.geol.22.2.121>.
8. Золотарев Д.Р., Капатская И.И., 2017. Апробация методики расчета диаметров карстовых провалов. Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии, № 9, URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=&s=500> (дата обращения: 12.09.2023).
9. Катаев В.Н., Кадебская О.И., 2010. Геология и карст города Кунгура. Изд-во Горного института УрО РАН, Пермь.
10. Кропоткин М.П., 2018. Оценка опасности карстового провалообразования — детерминированная или стохастическая? Инженерные изыскания, Том XII, № 9–10, с. 12–26, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-9-10-12-26>.
11. Максимович Г.А., 1963. Основы карстведения. Том 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермское книжное издательство, Пермь.
12. Максимович Н.Г., Кадебская О.И., Мещерякова О.Ю., 2021. Сульфатный карст Пермского края. Б.и., Пермь.
13. Огоноченко В.Н., 1979. Расчет диаметра опасной карстовой полости. В сб. статей Инженерные изыскания в строительстве. Серия 15, Вып. 5. Стройиздат, Москва, с. 18–19.
14. Печеркин А.И., Болотов Г.Б., Катаев В.Н., 1984. Изучение тектонической трещиноватости платформенных структур для карстологических целей. Изд-во Пермского университета, Пермь.
15. Протодяконов М.М., 1933. Давление горных пород и рудничное крепление. Часть 1. Давление горных пород, 3-е изд. Государственное научно-техническое издательство, Москва — Ленинград — Новосибирск.
16. Саваренский И.А., Мионов Н.А., 1995. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. Изд-во Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве, Москва.
17. Ступишин А.В., 1967. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Изд-во Казанского университета, Казань.
18. Толмачев В.В., Ройтер Ф., 1990. Инженерное карстведение. Недра, Москва.
19. Уткин М.М., Махнатов С.А., 2012. Сравнительный анализ расчетно-теоретических методов по прогнозированию диаметров карстовых провалов. Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях, Материалы Российской конференции с международным участием, Уфа, 2012, с. 262–267.
20. Хоменко В.П., 2003. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. ГЕОС, Москва.
21. Хоменко В.П., 2009. Карстово-обвальные провалы «простого» типа: полевые исследования. Инженерная геология, № 4, с. 40–48.
22. 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.
23. 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>.

REFERENCES

1. Andreychuk V.N., 1990. Sinkholes under gypsum caves-labyrinths and estimation of sustainability of karstified territories. Prut, Chernovtsy. (in Russian)

2. Andreychuk V.N., Dorofeev E.P., Lukin V.S., 1990. Organ pipes in carbonate-sulfate roof of caves. In the interuniversity collection of scientific papers V.G. Beltyukov, K.A. Gorbunova (eds), Caves. Problems of study, Vol. 22. Publishing house of the Perm State University, Perm, pp. 16–23. (in Russian)
3. Anikeev A.V., 1993. About two forms of destruction of cohesive soils over a cavity. *Geokologiya*, No. 2, pp. 115–123. (in Russian)
4. Anikeev A.V., 2017. Sinkholes and funnels in karst areas: formation mechanisms, forecast, and risk assessment. Publishing house of the RUDN, Moscow. (in Russian)
5. Anikeev A.V., 2019. Accumulation capacity of soluble rocks as the main stability index in covered karst areas. *Geokologiya*, No. 5, pp. 3–14, <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201953-14>. (in Russian)
6. Bazhutin P.I., 2022. Development of calculation methods to forecast of karst and karst-suffosion sinkholes. *Geology in the developing world, Collection of scientific papers based on the materials of the XV International scientific and practical Conference of students, postgraduates, and young scientists, Perm, 2022*, pp. 412–415. (in Russian)
7. Bazhutin P.I., Kataev V.N., Shcherbakov S.V., 2023. Stochastic consideration of geotechnical properties of soils and parameters of karst distribution in deterministic methods for prediction of karst collapses. *Bulletin of Perm University. Geology*, Vol. 22, Issue 2, pp. 121–132, <http://dx.doi.org/10.17072/psu.geol.22.2.121>. (in Russian)
8. Zolotarev D.R., Kapatskaia I.I., 2017. Approbation of the methodology of calculation of diameters of the karst holes. *Building and Architecture. Experience and Modern Technologies*, No. 9, URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=&s=500> (accessed: 12 September 2018). (in Russian)
9. Kataev V.N., Kadebskaya O.I., 2010. *Geology and karst of Kungur*. Publishing house of the Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm. (in Russian)
10. Kropotkin M.P., 2018. Estimation of karst sinkhole hazard — deterministic or stochastic? *Engineering Survey*, Vol. XII, No. 9–10, pp. 12–26, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-9-10-12-26>. (in Russian)
11. Maksimovich G.A., 1963. *Basics of karstology. Vol. 1. Issues of karst morphology, speleology, and hydrogeology*. Perm book publishing house, Perm. (in Russian)
12. Maksimovich N.G., Kadebskaya O.I., Meshcheriakova O.Yu., 2021. *Sulfate karst of the Perm Region*. No publ., Perm. (in Russian)
13. Ogonochenko V.N., 1979. Calculation of the diameter of a dangerous karst cavity. In collection of papers *Engineering surveys in construction*, Series 15, Issue 5. Stroyizdat, Moscow, pp. 18–19. (in Russian)
14. Pecherkin A.I., Bolotov G.B., Kataev V.N., 1984. Study of tectonic fracturing of platform structures for karstological purposes. Publishing house of the Perm University, Perm. (in Russian)
15. Protodyakonov M.M., 1933. *Rock pressure and mine bracing. Part 1. Rock pressure*, 3rd edition. Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatelstvo, Moscow — Leningrad — Novosibirsk. (in Russian)
16. Savarensky I.A., Mironov N.A., 1995. *Guide to engineering-geological surveys in areas of karst development*. Publishing house of the Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction, Moscow.
17. Stupishin A.V., 1967. *Plain karst and its development patterns: a case study of the Middle Volga region*. Publishing house of the Kazan University, Kazan. (in Russian)
18. Tolmachev V.V., Reuter F., 1990. *Engineering karstology*. Nedra, Moscow. (in Russian)
19. Utkin M.M., Makhnatov S.A., 2012. Comparative analysis of design-theoretical methods of the karst sinkholes' diameters forecasting. *Geotechnical problems of designing buildings and structures in karst-prone areas, Materials of the Russian Conference with International participation, Ufa, 2012*, pp. 262–267. (in Russian)
20. Khomenko V.P., 2003. *Principles and prognosis of suffosion processes*. GEOS, Moscow. (in Russian)
21. Khomenko V.P., 2009. Karst and collapse sinkholes of the “simple” type: field study. *Inzhenernaya Geologiya*, No. 4, pp. 40–48. (in Russian)
22. Khomenko V.P., 2015. Collapse sinkholes formation: mechanisms and hazard assessment. *Environmental safety and construction in karst areas, Proceedings of the International Symposium, Perm, 2015*, pp. 50–60. (in Russian)
23. 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. *Inzhenernaya Geologiya*, No. 6, pp. 10–23, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-10-23>. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БАЖУТИН ПАВЕЛ ИГОРЕВИЧ

Младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, Россия; начальник отдела инженерно-геологических изысканий ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Москва, Россия

ЩЕРБАКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Руководитель научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, Россия; руководитель управления инженерных изысканий ООО «Противокарстовая и береговая защита», к.г.-м.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PAVEL I. BAZHUTIN

Junior Research Scientist in the Scientific and Production Laboratory of Prognostic Modeling in Geosystems, Perm State National Research University; Perm, Russia; Head of Engineering-Geological Survey Department, Karst and Bank Protection LLC; Moscow, Russia

SERGEY V. SHCHERBAKOV

PhD (Geology and Mineralogy); Head of the Scientific and Production Laboratory of Prognostic Modeling in Geosystems, Perm State National Research University, Perm, Russia; Head of Engineering Survey Division, Karst and Bank Protection LLC; Moscow, Russia