

ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЕ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОМУ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЮ

CHANGING NONCOHESIVE SOIL GRANULOMETRIC COMPOSITION THAT PRECEDES KARST-PIPING SINKHOLE FORMATION



КРАШЕНИННИКОВ В.С.

Руководитель отдела изысканий ООО НПФ «Специальные изыскания для высотного строительства» (ООО НПФ «СИВС»), г. Москва, geolog.doc@gmail.com

ХОМЕНКО В.П.

Профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии Института гидротехнического и энергетического строительства национального исследовательского университета «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), д. г.-м. н., г. Москва, khomenko_geol@mail.ru

KRASHENINNIKOV V.S.

Head of the Survey Department, "Special surveys for high-rise construction" LLC RPC, Moscow, geolog.doc@gmail.com

KHOMENKO V.P.

Professor of the Engineering Surveys and Geoecology Department of the Hydraulic Engineering and Power Plant Construction Institute of the National Research University "Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, khomenko_geol@mail.ru

Ключевые слова:

карст; суффозия; несвязные грунты; карстово-суффозионный провал; прогноз.

Key words:

karst; suffosion (piping); noncohesive soils; karst-piping sinkhole; prediction.

Аннотация

Существуют ранние признаки подготовки провалообразования в условиях покрытого карста, выражающиеся в особенностях строения покрывающей толщи. К ним, в частности, относятся зоны суффозионного разуплотнения несвязных грунтов над трещинами и полостями, присутствующими в растворимых породах. Наличие таких зон в геологическом разрезе может расцениваться как предвестник появления карстово-суффозионного провала. В статье дано подробное описание этого феномена, исследованного с помощью лабораторного физического моделирования и в натуральных условиях. Изложены принципы поиска и идентификации зон суффозионного разуплотнения на основе анализа пространственного распределения параметров гранулометрического состава несвязных грунтов, слагающих нижнюю часть покрывающей толщи.

Abstract

In covered karst areas, there are precursory signs of a preparing sinkhole formation. These signs are features of the overburden structure. In particular, they include suffosion decompaction zones of noncohesive soils over fissures and cavities in soluble rocks. The existence of such zones in a geological cross-section can be considered as a precursor of a karst-piping sinkhole formation. This paper presents a detailed description of this phenomenon studied using a laboratory physical modeling and in the natural conditions. The authors consider the principles of search and identification of suffosion decompaction zones on the basis of analyzing the spatial distribution of granulometric composition parameters of noncohesive soils in the lower part of the overburden.

Введение

В Российской Федерации большинство интенсивно осваиваемых карстоопасных территорий расположено в районах покрытого карста, где над растворимыми породами залегают осадочные нецементированные отложения мощностью более 2 м [7]. Эти отложения чаще всего называют покрывающей толщей. Еще Д.С. Соколов в своей основополагающей работе [22] отмечал, что присутствие в покрывающей толще некоторых структурных элементов может свидетельствовать о подготовке карстового провалообразования.

В нашей стране этим вопросом занимались Н.М. Кухарев [16], В.П. Хоменко [28], В.В. Толмачев [24], В.М. Кутепов и В.Н. Кожевникова [15], Г.В. Земской и Л.А. Алешина [8], А.В. Анিকেев и М.В. Леоненко [4]. При этом следует заметить, что А.В. Анিকেев в целом ряде своих работ представил серьезное экспериментальное и теоретическое обоснование необходимости изучения покрывающей толщи для прогноза формирования карстовых провалов. За рубежом аналогичных взглядов придерживаются Г. Адерхолд [1], У. Джоу и Б. Бек [34], Ф. Гутьеррес, Э. Купер и К. Джонсон [32]. Обобщающий взгляд на проблему поиска признаков подготовки карстового провалообразования по результатам инженерно-геологических изысканий, выполняемых в районах покрытого карста, был изложен в публикациях В.С. Крашенинникова и В.П. Хоменко [13, 14].

Карстово-суффозионные провалы

Согласно традиционным представлениям [21] в условиях покрытого карста могут формироваться карстовые провалы трех генетических типов — карстово-обвальные, карстово-суффозионные и смешанные (карстово-суффозионно-обвальные).

Карстово-суффозионные провалы (рис. 1) образуются при наличии в покрывающей толще несвязных грунтов и появлении в них нисходящего фильтрационного потока, который разгружается в незакольматированные трещины или полости, присутствующие в растворимых породах. В свое время М.С. Кавеев [10] и Г.В. Короткевич [12] дали подробное описание двух типов карстово-суффозионных провалов, различающихся по условиям и механизмам их



Рис. 1. Карстово-суффозионный провал, образовавшийся в декабре 1996 года в промышленной зоне г. Дзержинска Нижегородской области в результате сброса воды в песчаные грунты

формирования. Одним из авторов данной статьи было предложено называть их карстово-суффозионными провалами фреатического и вадозного типов [27].

Для формирования карстово-суффозионных провалов фреатического типа (рис. 2) необходимо, чтобы несвязные грунты были водонасыщенными. Они могут непосредственно контактировать с растворимыми породами или отделяться от них водоупорным слоем, сложенным глинистыми грунтами. Во втором случае водоупор должен иметь сквозные нарушения сплошности, причины появления которых могут быть разными, вплоть до чисто техногенных [26]. Наиболее подробно процессы сквозного разрушения экранирующего водоупора были исследованы А.В. Анিকেевым [2]. При оттоке воды из растворимых пород и (или) ее поступлении в вышележащие несвязные грунты в них появится фильтрационный поток, направленный в трещину или полость. Когда он достигнет достаточной скорости, начнется развитие суффозионного процесса внутри некоторой четко ограниченной зоны (рис. 2, а). По мере дальнейшего ро-



Рис. 2. Схема, иллюстрирующая механизм формирования карстово-суффозионного провала фреатического типа, вызванного оттоком воды из растворимых пород: 1 — растворимые породы; 2 — глинистые грунты; 3 — несвязные грунты; 4 — несвязные и (или) связные дисперсные грунты; 5 — уровень надкарстовых вод; 6 — пьезометрический уровень карстовых вод; 7 — полость, заполненная водой; 8 — зона суффозионного разрушения; 9 — грунты, разрушенные суффозией и испытавшие нисходящее перемещение; 10 — грунты, испытавшие обрушение; 11 — полость, не заполненная водой; 12 — провал

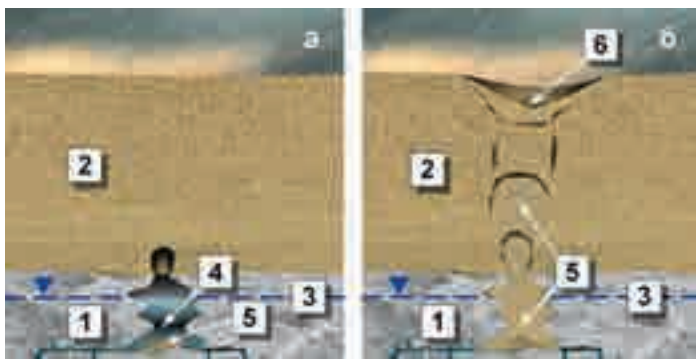


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая механизм формирования карстово-суффозионного провала вадозного типа, вызванного инфильтрацией атмосферных осадков: 1 — растворимые породы; 2 — несвязные грунты; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — полость, заполненная водой; 5 — грунты, разрушенные суффозией и испытавшие нисходящее перемещение; 6 — провал

ста скорости потока эта зона будет увеличиваться в размерах, достигнет верхней границы зоны насыщения и над ней начнется обрушение вышележащих грунтов (рис. 2, б), которое может привести к образованию провала [10, 27] (рис. 2, в).

Карстово-суффозионные провалы вадозного типа возникают там, где растворимые породы перекрыты несвязными дисперсными грунтами, залегающими вплоть до земной поверхности, а уровень грунтовых вод расположен ниже подошвы этих грунтов (рис. 3). В таких условиях поступление воды в покрывающую толщу приве-

дет к появлению сосредоточенного фильтрационного потока в зоне контакта несвязных отложений с трещиной или полостью. При достаточной гидродинамической силе этого потока он вызовет суффозионное разрушение несвязных грунтов и их вынос в трещину или полость (рис. 3, а). В неблагоприятной обстановке это приведет к циклическому формированию и исчезновению все более крупных неустойчивых не заполненных водой полостей, ограниченных сверху и снизу куполообразными сводами. Каждая следующая полость занимает более высокое положение по сравнению с предыдущей, что и обеспечивает принципиальную возможность образования провала [12, 27] (рис. 3, б).

Суффозия как составная часть карстово-суффозионного провалообразования

Суффозия играет важнейшую роль в формировании карстово-суффозионных провалов, что вытекает из самого их названия, однако в этом вопросе дает о себе знать большая терминологическая неопределенность. Сам по себе термин «суффозия» трактуется по-разному, иногда взаимоисключаяще [17, 19]. Наиболее широкое определение этого понятия дано в СП 116.13330.2012 [23], и в соответствии с ним один из авторов данной статьи [26] классифицирует суффозию по двум признакам (рис. 4). В рамках этой понятийной системы можно утверждать, что карстово-суффозионные провалы формируются в результате механической закрытой (внутренней) суффозии, а именно полного фильтрационного разрушения несвязных пород покрывающей толщи нисходящим потоком и их перемещения в незакольматированные трещины и полости, присутствующие в растворимых породах.

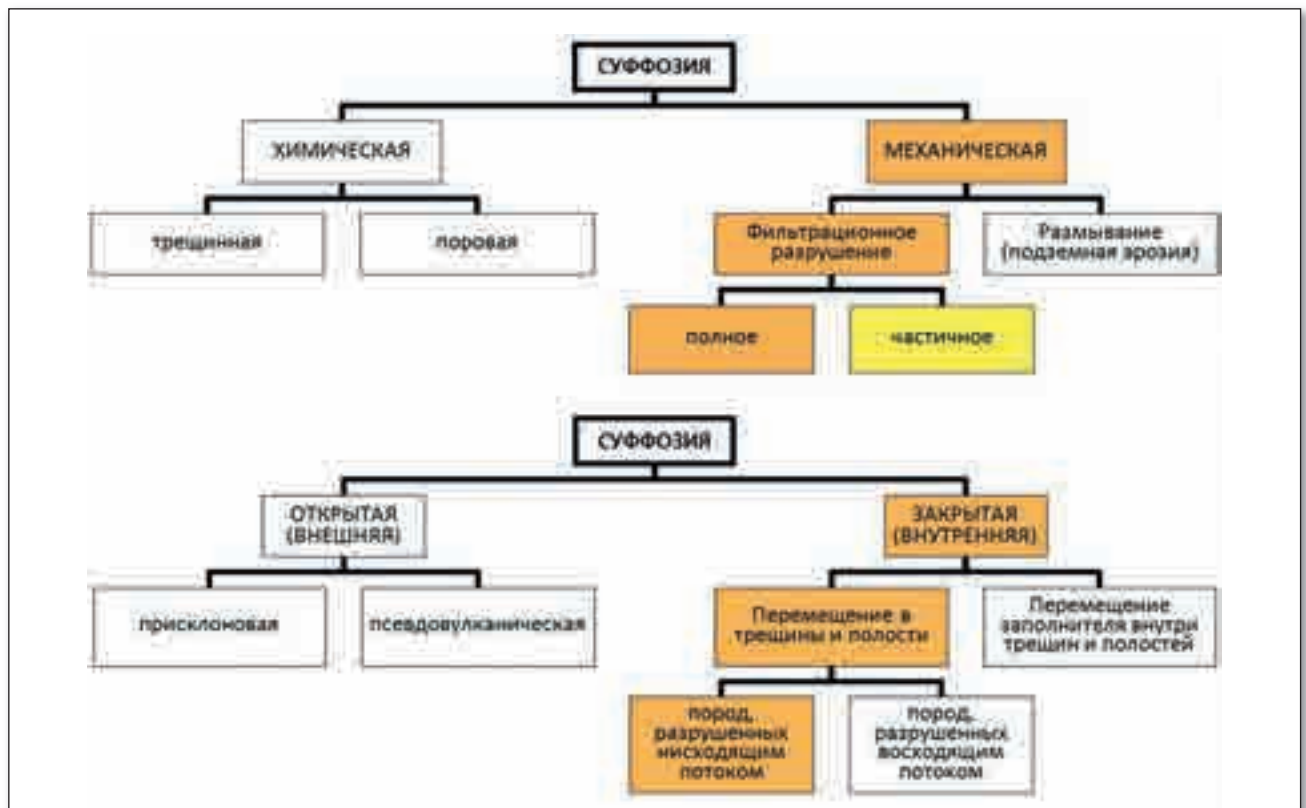


Рис. 4. Классификации суффозии, предложенные В.П. Хоменко [26], по характеру разрушения горных пород (сверху) и по условиям выноса и перемещения разрушенных пород (снизу). Цветом выделены разновидности суффозии, обеспечивающие формирование карстово-суффозионных провалов (коричневым) и появление признаков их подготовки (желтым)

Полное фильтрационное разрушение несвязного грунта представляет собой разрушение его структурных связей, в результате которого грунт переходит в состояние ложного плавуча. Однако в определенных условиях этому может предшествовать частичное фильтрационное разрушение — вынос фильтрационным потоком нерастворимых частиц сквозь поры несвязных дисперсных грунтов. Для наименования этого процесса используют и другие термины, а иногда именно его понимают под словом «суффозия» и никакой другой суффозии не признают [9]. Причем такое понимание широко распространено за рубежом. Например, то, что авторы данной статьи называют частичным фильтрационным разрушением, англо- и немецкоязычными специалистами именуется *suffosion* [31, 35]. Гораздо труднее подобрать в английском языке однозначный синоним для термина «полное фильтрационное разрушение», поскольку в публикациях на эту тему данный процесс именуется *ripping* [33], *boiling* [30], *internal erosion* [33], а также похожими на них и производными от них терминами.

Условия, необходимые для суффозионного разуплотнения несвязных грунтов

Как частичное, так и полное фильтрационное разрушение несвязных грунтов может привести к их разуплотнению. Разуплотнение (а точнее, разрыхление), вызванное полным фильтрационным разрушением, может испытать любой несвязный грунт. Разуплотнение же, вызванное частичным фильтрационным разрушением, присуще только так называемым суффозионным грунтам, структурно-текстурные особенности которых позволяют мелким частицам перемещаться между неподвижными крупными частицами под действием фильтрационных потоков. Для этого необходимо, чтобы несвязный грунт состоял из тесно контактирующих друг с другом частиц (скелета), между которыми свободно располагаются более мелкие частицы (заполнитель).

В настоящее время в нашей стране [25] и за рубежом [31] используется немало способов оценки «суффозионности» несвязных грунтов на основе математической обработки параметров их гранулометрического состава и показателей физических свойств. Например, в России хорошо известны соответствующие разработки

ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, а также способ, рекомендуемый пособием к СНиП 2.04.02-84 [20], базирующийся на исследованиях А.Н. Патрашева [18]. Весьма основательной и глубоко проработанной представляется методика, предложенная В.Н. Кондратьевым [11] и усовершенствованная П.И. Фадеевым [25], поскольку при ее использовании требуется поэтапная графоаналитическая обработка параметров грунта, а оценка дается по критериям, позволяющим идентифицировать несуффозионные грунты не одного и даже не двух, а трех типов (рис. 5). Последовательность действий, осуществляемых в соответствии с этой методикой, такова.

1. Анализируют дифференциальную кривую гранулометрического состава грунта (рис. 6) и, если она имеет одну вершину, грунт считают несуффозионным, поскольку он не обладает необходимой неоднородностью и его нельзя разделить на скелет и заполнитель (см. рис. 5, а).

2. На дифференциальной кривой гранулометрического состава находят седловину между двумя вершинами и ближайшую к ней границу между фракциями считают границей между скелетом и заполнителем. По данным о процентном содержании в грунте отдельных фракций его гранулометрического состава рассчитывают процентное содержание в нем заполнителя.

3. Проверяют соблюдение условия:

$$n_s = \frac{e + a}{e + 1} > 0,5, \quad (1)$$

где n_s — пористость скелета, д. ед.; e — коэффициент пористости грунта; a — содержание в грунте заполнителя, д. ед.

Если это условие соблюдается, грунт считают несуффозионным (см. рис. 5, б). В.Н. Кондратьев [11] называл его грунтом с псевдопорфировой текстурой, а грунт, не отвечающий этому критерию, — грунтом с бутовой текстурой.

4. Строят две интегральные кривые гранулометрического состава — для заполнителя и для скелета грунта (рис. 6). Затем определяют один характерный диаметр частиц заполнителя (d_{70}) и три характерных диаметра частиц скелета (D_{60} , D_{50} , D_{10}).

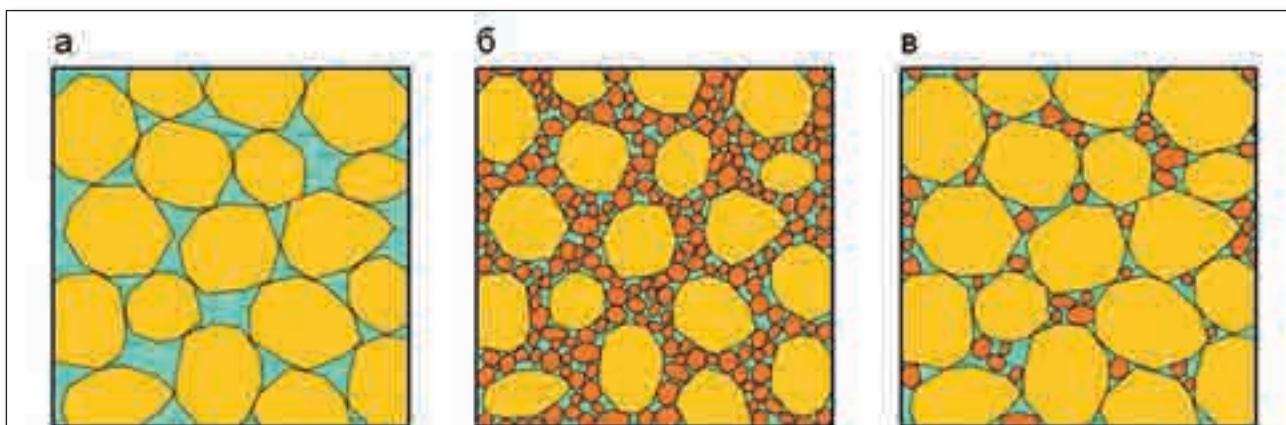


Рис. 5. Основные виды несуффозионных несвязных грунтов: а — однородный; б — с псевдопорфировой текстурой по терминологии В.Н. Кондратьева [11]; в — с отсутствием возможности свободного перемещения частиц заполнителя между частицами скелета под действием гидродинамических сил. Частицы скелета показаны желтым цветом, частицы заполнителя — оранжевым



Рис. 6. Пример паспорта грунта, использованного в качестве материала модели при экспериментальном изучении суффозионного процесса

5. Проверяют соблюдение условия:

$$0,214 D_{60} D_{50} / D_{10} < d_{70}, \quad (2)$$

где D_{60} , D_{50} , D_{10} — диаметр, который не превышает соответственно 60, 50 и 10% частиц заполнителя, мм; d_{70} — диаметр, который не превышают 70% частиц скелета, мм.

Если это условие соблюдается, частицы заполнителя не имеют возможности свободно перемещаться между частицами скелета под действием гидродинамических сил, поэтому грунт считают несуффозионным (см. рис. 5, в).

По результатам оценки составляется паспорт грунта, содержащий все необходимые исходные данные, результаты расчетов по формулам (1) и (2) и окончательный вывод о суффозионности этого грунта. Образец такого паспорта показан на рис. 6.

При фильтрации воды через суффозионный грунт может начаться движение частиц заполнителя между частицами скелета, но только тогда, когда фильтрационный градиент достигнет некоторой критической величины. Заполнитель приходит в движение при значениях градиента, измеряемых десятками долями единицы, и при этом происходит увеличение водопроницаемости грунта как результат прогрессирующего выноса частиц заполнителя (рис. 7). При величинах градиента, близких к единице, начнется полное фильтрационное разрушение суффозионного грунта. В случае несуффозионных несвязных грунтов (см. рис. 5) в ходе роста фильтрационного градиента возникает только их полное фильт-

рационное разрушение, причем до этого момента их водопроницаемость не изменяется.

Концептуальная схема разуплотнения несвязных грунтов над одиночной полостью-приемником, предшествующего формированию карстово-суффозионного провала

Перемещаемые подземным потоком мелкие частицы несвязного суффозионного грунта в конечном итоге должны попасть в некое пустотное пространство — полость-приемник. Их движение зависит от скорости подземного потока, которая возрастает по мере приближения к входу в эту полость. В массиве суффозионного грунта, в котором начался процесс его частичного фильтрационного разрушения над единичной полостью-приемником, следует ожидать формирования трех зон (рис. 8).

Зона 1 отвечает первоначальному, не затронутому суффозией, состоянию грунтового массива. Гранулометрический состав грунтов в ней не изменен (см. рис. 7, а). Она находится на значительном удалении от входа в полость-приемник.

Зона 2 расположена в относительной близости к полости-приемнику и представлена грунтами, гранулометрический состав которых был заметно изменен суффозионным процессом, то есть значительная часть заполнителя была удалена фильтрационным потоком и грунт стал более однородным (см. рис. 7, б).

Зона 3 находится непосредственно у входа в полость-приемник. В ней гранулометрический состав грунтов радикально изменен суффозией и характеризуется практически полным отсутствием заполнителя, а также высокой степенью однородности. Фактически грунты этой зоны перестают быть суффозионными (см. рис. 7, в).

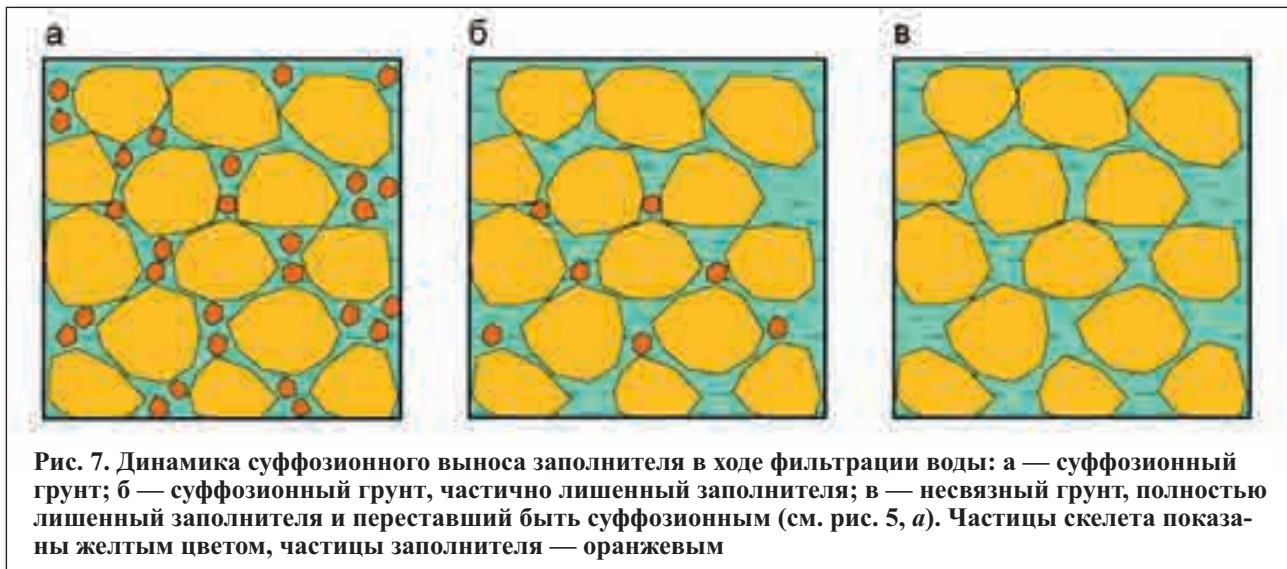


Рис. 7. Динамика суффозионного выноса заполнителя в ходе фильтрации воды: а — суффозионный грунт; б — суффозионный грунт, частично лишенный заполнителя; в — несвязный грунт, полностью лишенный заполнителя и переставший быть суффозионным (см. рис. 5, а). Частицы скелета показаны желтым цветом, частицы заполнителя — оранжевым

Разумеется, четких границ, разделяющих зоны 1–3, не может быть в принципе. Контуры этих зон показаны на рис. 8 условно, поскольку содержание заполнителя в массиве изменяется плавно, уменьшаясь по мере приближения к полости-приемнику. Тем не менее ничто не мешает определить некоторые критерии для выделения этих зон. Представляется целесообразным принять за переход от третьей зоны ко второй снижение содержания заполнителя на 30–40% от первоначального (фоновое). Остаток заполнителя в количестве 10–20% от фоновое можно принять соответствующим переходу к первой зоне.

Можно предположить, что при отсутствии перекрывающего водоупора (или при нарушении его целостности) концентрическое уменьшение содержания заполнителя в суффозионных грунтах, слагающих нижнюю часть покрывающей толщи, способно выступить в роли прогностического признака подготовки образования карстово-суффозионного провала. Если же эти грунты несущезуффозионны, то возможность такого прогноза отсутствует.

Экспериментальные исследования суффозионного изменения гранулометрического состава несвязных дисперсных грунтов над полостью-приемником

Моделирование суффозионного выноса мелких частиц несвязного грунта нисходящим фильтрационным потоком в полость-приемник выполнялось на упрощенном и уменьшенном рабочем образце в экспериментальной установке конструкции В.П. Хоменко, Е.П. Маханько, Е.И. Исаева и др. [29], общий вид которой показан на рис. 9. Целью этого эксперимента являлась проверка предлагаемой концептуальной схемы (см. рис. 8).

Рабочая камера установки размером 32×20×17 см послойно заполнялась модельным материалом с несильным уплотнением на высоту 16 см. Этот материал представлял собой искусственную двухкомпонентную смесь, состоявшую примерно из 85% дресвяного грунта (скелета) и 15% песка средней крупности (заполнителя). Плотность материала модели нашли методом режущего кольца объемом 140 см³, остальные параметры получили методом расчета. Гранулометрический состав определили лабораторным методом согласно требованиям российских государственных

стандартов [5, 6]. Степень неоднородности материала составила 16,3.

Еще до проведения опыта была оценена суффозионность материала модели: если бы он оказался несущезуффозионным, эксперимент потерял бы смысл. Паспорт исходного грунта, послужившего материалом для модели, представлен на рис. 6. Для исходного грунта была получена трехвершинная дифференциальная кривая гранулометрического состава, причем две правые вершины были выражены наиболее контрастно. Следовательно, заполнитель был сложен частицами размером менее 1 мм. Расчет показал, что исходный грунт обладал бутовой текстурой и частицы заполнителя имели возможность свободно перемещаться между частицами скелета под действием гидродинамических сил, то есть материал модели являлся суффозионным.

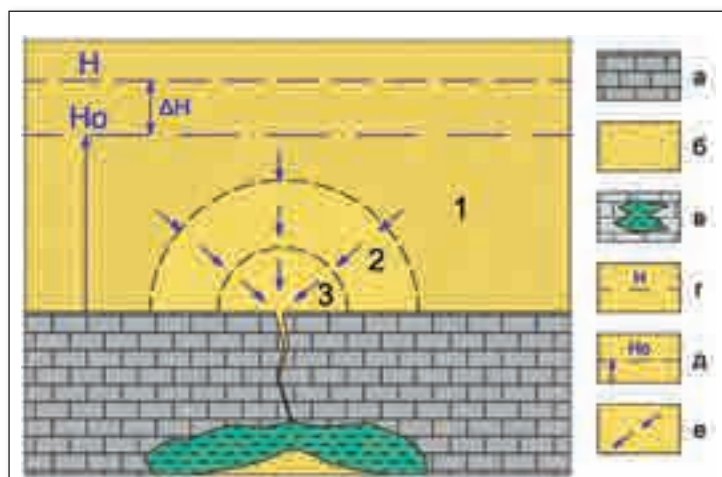


Рис. 8. Схема условного зонирования водонасыщенной толщи несвязных грунтов, испытывавших изменение гранулометрического состава под влиянием карстово-суффозионного процесса. Условные обозначения: 1–3 — соответственно зоны 1–3, описание которых приведено в тексте; а — растворимые породы; б — несвязные грунты; в — карстовая полость; г — уровень надкарстовых вод; д — пьезометрический уровень карстовых вод; е — направление фильтрационного потока; $\Delta H = H - H_0$ (где H — уровень надкарстовых вод; H_0 — пьезометрический уровень карстовых вод)



Рис. 9. Экспериментальное оборудование, предназначенное для моделирования суффозионных процессов: 1 — рабочая камера, частично заполненная материалом модели; 2 — боковые камеры, заполняемые водой; 3 — нижняя камера, имитирующая карстовую полость-приемник; 4 — водопроницаемые перегородки, отделяющие боковые камеры от рабочей; 5 — дно рабочей камеры; 6 — прорезь, имитирующая карстовый канал; 7 — перепускная трубка; 8 — трубки, соединяющие боковые камеры; 9 — дренажные трубки нижней камеры



Рис. 10. Схема отбора образцов материала модели из рабочей камеры экспериментальной установки после проведения опыта (а) и использовавшиеся для этого инструменты (б)

Эксперимент начался с заполнения водой боковых камер, из которых через сетчатые перегородки-фильтры вода поступала в рабочую камеру и насыщала материал модели. Заполнение камер происходило в течение 5 минут до уровня 15 см, затем в течение 3 минут с помощью перепускной трубки уровень поддерживался на заданной отметке. Фильтрационный поток разгружался в нижнюю камеру через прорезь, вынося частицы грунта. Через сливные трубки осуществляли отток воды из нижней камеры, не давая ей наполниться доверху. Спустя 3 минуты подачу воды прекращали и происходил ее свободный слив через прорезь до осушения всех камер. После проведения трех циклов «налив — поддержание уровня — слив» из материала модели отбирались пробы для исследования на гранулометрический состав (рис. 10). Для каждой из проб определялись два параметра — процентное содержание заполнителя и степень неоднородности.

По результатам эксперимента вначале было проанализировано распределение процентного содержания заполнителя в вертикальной плоскости. Результат, представленный на рис. 11, свидетельствует о большом скоплении заполнителя в центральной части рабочей камеры и о его малом количестве в верхних слоях и внизу, над прорезью. Скопление заполнителя в центральной части объясняется характером движения фильтрационного потока при насыщении водой материала модели, так как поток в это время движется почти горизонтально от бо-

ковых перегородок к середине рабочей камеры. При перетоке воды в нижнюю камеру происходит нисходящее перемещение частиц заполнителя, но не вертикально вниз, а со смещением к центру, расположенному над прорезью. Малое количество заполнителя в центре нижнего слоя объясняется самыми высокими значениями фильтрационного градиента и, соответственно, самым интенсивным выносом заполнителя в нижнюю камеру в этом месте.

С уверенностью можно сказать, что в натуральных условиях картина распределения заполнителя, представленная с помощью изолиний, была бы иной. При доминировании вертикальной составляющей фильтрационного потока над горизонтальной это было бы семейство полуэллиптических линий, концентрически расходящихся от входа в полость-приемник. Количество заполнителя уменьшалось бы с приближением к полости-приемнику вплоть до его полного выноса, в целом соответствуя теоретической схеме (см. рис. 8).

Картина пространственного распределения степени неоднородности грунта (C_u) отражает практически линейную зависимость этого параметра от расстояния между точкой его замера и входом в полость-приемник (рис. 12). Величина C_u тем меньше, чем ближе к прорези находится грунт, поскольку он становится более однородным за счет суффозионного выноса заполнителя.

Изменения гранулометрического состава несвязных дисперсных грунтов, выявленные на участке формирования карстово-суффозионных провалов в г. Москве

Частичное фильтрационное разрушение суффозионного грунта в виде выноса его частиц представляет собой лишь начальную стадию суффозионного процесса, а далее все происходит так, как показали исследования В.П. Хоменко [26] и А.В. Аникеева [3]. Исходя из теоретических соображений можно предположить, что картина разуплотнения суффозионного грунта, слагающего нижнюю часть покрывающей толщи, которая соответствует схеме, представленной на рис. 8, должна сохраниться даже после появления карстово-суффозионного провала.

Справедливость этого предположения подтверждается результатами анализа распределения в плане параметров гранулометрического состава водонасыщенных четвертичных песков на участке двух карстово-суффозионных провалов, образовавшихся в 1969 году на северо-западе г. Москвы (рис. 13). Здесь в 1975 году прослеживалось снижение содержания пылевато-глинистых частиц в песках и степени неоднородности гранулометрического состава этих песков по мере приближения к зоне провалов [28]. Кроме того, в восточной части участка проявилась зона аналогичных изменений.

Толща водонасыщенных песков на исследованном участке была представлена двумя слоями — мелкими, реже пылеватыми песками вверху и песками средней крупности, реже крупными и гравелистыми внизу. Анализ распределения показателей гранулометрического состава этих водонасыщенных песков в горизонтальной плоскости осуществлялся в привязке к определенным диапазонам глубины их залегания — 22,0–23,5 м для верхнего слоя и 24,0–25,5 м для нижнего. В песках обоих слоев заполнителем являются частицы размером менее 0,01 мм.



Рис. 11. Пространственное распределение содержания заполнителя в материале модели после проведения опыта



Рис. 12. Пространственное распределение степени неоднородности (C_u) материала модели после проведения опыта

Были построены четыре карты-схемы распределения в плане процентного содержания заполнителя в водонасыщенных песках и коэффициента неоднородности их гранулометрического состава отдельно для каждого слоя. Одна из этих карт показана на рис. 14. Их анализ позволил выявить на исследованном участке две зоны с

признаками суффозионных изменений. Это районы скважин № 1, 14, 16 (первая зона) и скважин № 7, 12 (вторая зона). В первой зоне расположены существующие карстово-суффозионные провалы, вследствие чего произошел суффозионный вынос заполнителя из залегающих в ней песков. Существование второй зоны ско-

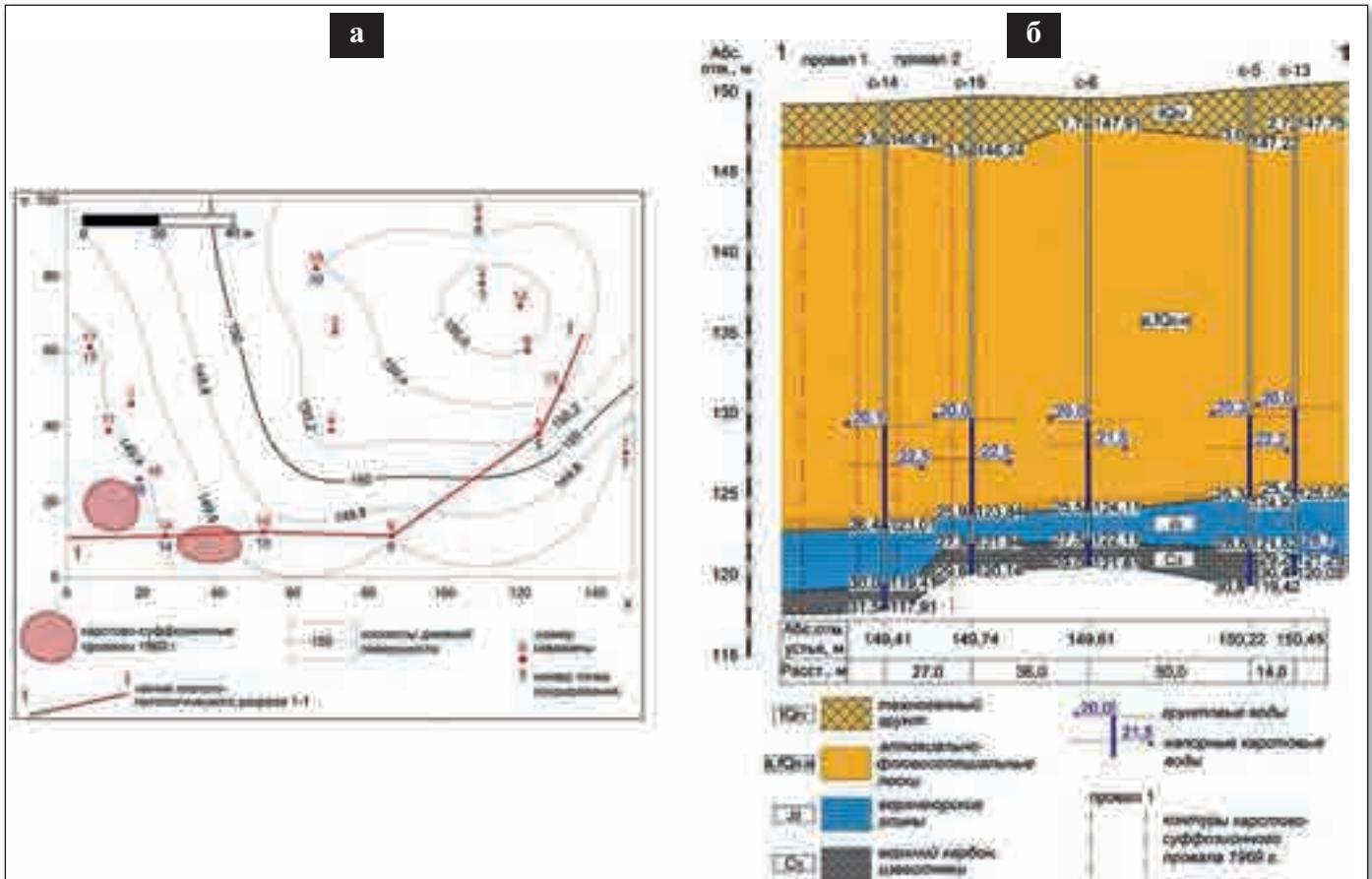


Рис. 13. Карта, построенная по результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных на исследованном участке (а), и схематичный геолого-литологический разрез по линии 1-1 (б). X, Y — условные оси координат, м

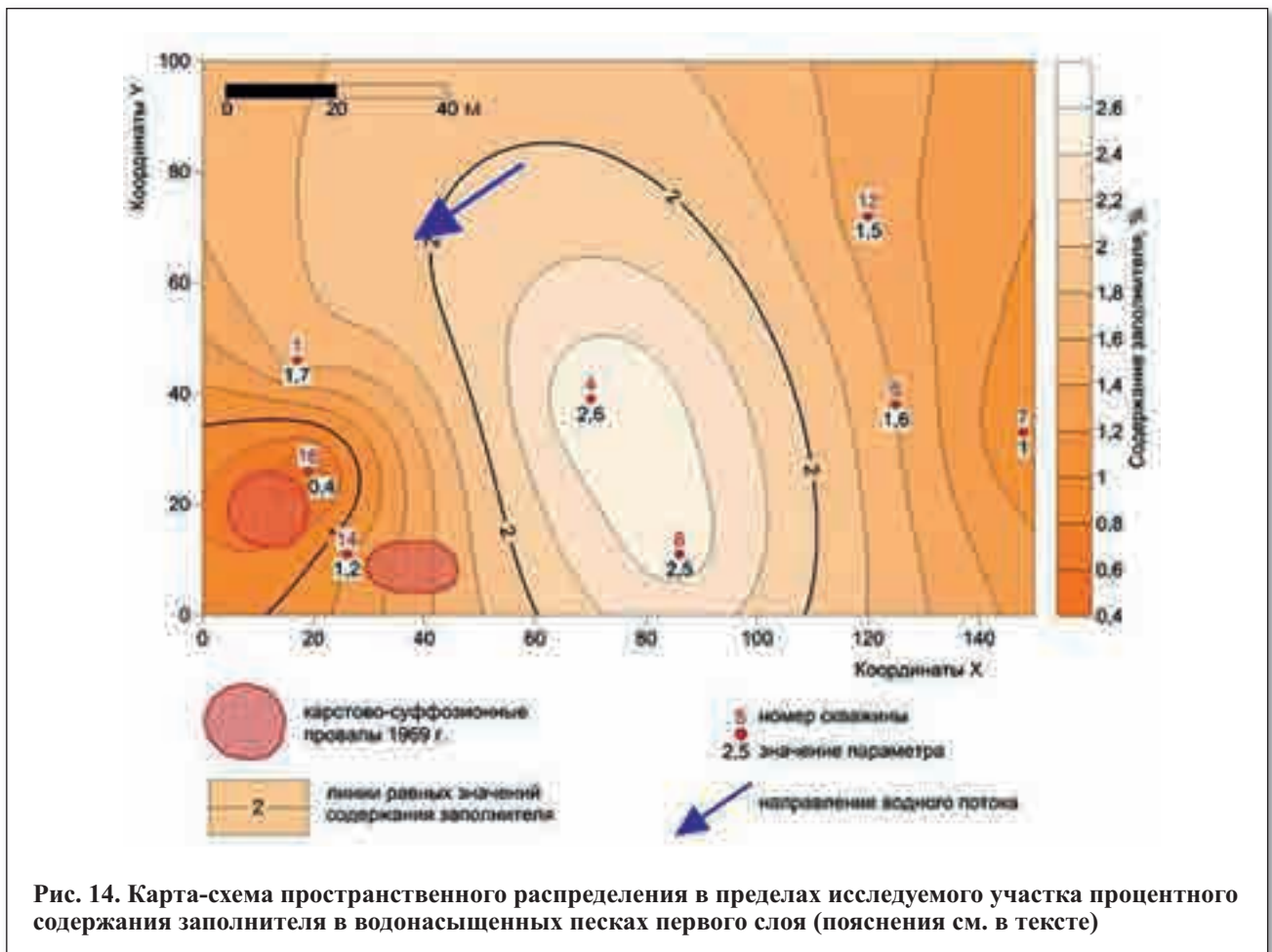



Рис. 14. Карта-схема пространственного распределения в пределах исследуемого участка процентного содержания заполнителя в водонасыщенных песках первого слоя (пояснения см. в тексте)

рее всего свидетельствует о суффозионных изменениях, предшествующих будущему провалу.

Заключение

Карстово-суффозионные провалы относятся к разряду опасных для строительства поверхностных проявлений покрытого карста. В их формировании ведущую роль играет процесс, именуемый суффозией, развитие которого может в определенных обстоятельствах оставить заметный след в покрывающей толще в виде зон суффозионного разуплотнения несвязных дисперсных грунтов. Эти зоны представляют собой результат закономерного изменения гранулометрического состава несвязных грунтов в результате суффозионного выноса их мелких частиц в карстовые трещины и полости. Формируются такие структурные элементы покрывающей толщи только в так называемых суффозионных грунтах, которые состоят из неподвижных частиц (скелета) и вы-

носимых подвижных частиц (заполнителя), обладающих еще рядом других признаков, оцениваемых по специальным критериям.

Поиск и идентификация зон суффозионного разуплотнения осуществляются с помощью анализа пространственного распределения процентного содержания заполнителя в несвязных грунтах или степени неоднородности их гранулометрического состава (по данным исследований грунтов, отобранных из скважин). Выбор именно этих двух показателей в качестве идентифицирующих параметров основан на результатах лабораторного физического моделирования выноса заполнителя несвязного грунта сквозь поры его скелета нисходящим фильтрационным потоком в перекрытую этим грунтом полость-приемник. Присутствие в покрывающей толще зон суффозионного разуплотнения, имеющих определенную внутреннюю структуру и конфигурацию, свидетельствует о возможном появлении со временем карстово-суффозионных провалов. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адерхолд Г.* Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена / пер. с нем. В.В. Толмачева. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2010. 112 с.
2. *Аникеев А.В.* О двух формах разрушения связных грунтов над полостью // *Геоэкология*. 1993. № 2. С. 115–123.
3. *Аникеев А.В.* Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // *Геоэкология*. 2006. № 6. С. 544–553.
4. *Аникеев А.В., Леоненко М.В.* Прогноз провалообразования при изменении гидродинамического режима на примере Дзержинского карстового района // *Геоэкология*. 2013. № 2. С. 130–146.
5. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Госстрой СССР, 1979.
6. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 1995.
7. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Карст мира. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2007. 331 с.
8. *Земской Г.В., Алешина Л.А.* Структурные признаки образования карстовой формы рельефа // *Материалы Научно-производственной конференции «Инженерные изыскания в XXI веке»*. М.: Изд-во ПНИИИС, 2003. С. 11–13.
9. *Истомина В.С.* Фильтрационная устойчивость грунтов. М.: Госстройиздат, 1957. 295 с.
10. *Кавеев М.С.* Карстово-суффозионные явления в левобережной части долины Волги в пределах Татарской АССР // *Известия Всесоюзного географического общества*. 1956. Т. 88. Вып. 5. С. 460–466.
11. *Кондратьев В.Н.* Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах. Симферополь: Крымиздат, 1958. 76 с.
12. *Короткевич Г.В.* О карстово-суффозионных формах и мерах предупреждения их развития при строительстве // *Грунтоведение и инженерная геология*. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. С. 155–160.
13. *Крашенинников В.С., Хоменко В.П.* Изучение покрывающей толщи как один из важнейших компонентов инженерных изысканий в районах покрытого карста // *Вестник МГСУ*. 2011. № 5. С. 113–119.
14. *Крашенинников В.С., Хоменко В.П.* Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 11. С. 6–8.
15. *Кутепов В.М., Кожневникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
16. *Кухарев Н.М.* Инженерно-геологические изыскания в областях развития карста в целях строительства. М.: Стройиздат, 1975. 168 с.
17. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 479 с.
18. *Патрашев А.Н.* Методика подбора гранулометрического состава обратных фильтров // *Сборник трудов Государственного института проектирования на речном транспорте*. Л.: Изд-во Гипроречтранса, 1957. С. 33–47.
19. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986. 415 с.
20. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84). М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
21. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: Изд-во ПНИИИС, 1995. 167 с.
22. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 320 с.

23. СП 116.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 22-02-2003). Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. М.: Минрегион России, 2012.
24. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
25. Фадеев П.И. Методические рекомендации по изучению и использованию гранулометрии песчаных пород в инженерно-геологических целях. М.: Изд-во МГУ, 1974. 112 с.
26. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
27. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Материалы Международного симпозиума «Экологическая безопасность строительства в карстовых районах» / под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. С. 50–60.
28. Хоменко В.П. Суффозионные свойства водонасыщенных песков вблизи зоны карстово-суффозионных провалов // Инженерные изыскания в строительстве. 1976. Серия 2. Выпуск 11 (52). С. 15–22.
29. Хоменко В.П., Маханько Е.П., Исаев Е.И. и др. Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов: патент РФ № 1823923 А3 // Официальный бюллетень Госпатента СССР № 23. М.: Госпатент СССР, 1993.
30. Dunn I.S., Anderson L.R., Kiefer F.W. Fundamentals of geotechnical analysis. New York: John Wiley & Sons, 1980. 414 p.
31. Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bel G., Foster M. Geotechnical engineering of dams. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1382 p.
32. Gutiérrez F., Cooper A.H., Johnson K.S. Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazard in evaporite karst areas // Environmental Geology. 2008. V. 53. № 5. P. 1007–1022.
33. Terzaghi K., Peck R.B. Soil mechanics in engineering practice. New York: John Wiley & Sons, 1948. 566 p.
34. Zhou W., Beck B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications // Environmental Geology. 2008. V. 55. № 4. P. 837–851.
35. Ziems J. Neue Erkenntnisse hinsichtlich der verformungsbeständigkeit der lockergesteine gegenüber wirkungen des sickerwassers. 1. Zur klassifizierung der mechanischen erdstoffverformungen durch wirkungen sickerwasser // Wasserwirt-Wassertechn. 1967. Bd. 17. S. 50–55.





Журнал «Инженерные изыскания» — лучшая площадка для вашей рекламы!



Если ваша целевая аудитория – профессиональное изыскательское сообщество, руководство изыскательских и проектно-изыскательских компаний, а также проектных институтов нефтегазодобывающей, военной, авиационной отраслей, то мы с удовольствием предоставим вам страницы журнала «Инженерные изыскания» для размещения вашей рекламной информации.

Наши читатели – это тысячи инженеров-изыскателей из всех регионов Российской Федерации и стран СНГ, каждый из которых находит в журнале нужную, актуальную информацию по своей специализации – геологии, геофизике, геодезии, экологии, геотехническому мониторингу. Ваша реклама в соответствующих тематических разделах журнала – гарантия того, что она дойдет до конечного потребителя ваших услуг и продукции.

Наша задача — сделать вашу рекламную кампанию эффективной!

**Наша цель — создание партнерских, дружеских отношений
для развития совместных проектов!**

Давайте сотрудничать и добиваться успеха вместе!

107076, г. Москва, Электrozаводская ул., д. 60.

Тел.: +7 (495) 210-63-90.

Крюков Павел

kpp@geomark.ru, www.geomark.ru