

на правах рукописи



Крашенинников Вадим Сергеевич

**ЛОКАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ
С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ПОКРЫВАЮЩЕЙ ТОЛЩИ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель:

Хоменко Виктор Петрович,
доктор геолого-минералогических наук, старший
научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Аникеев Александр Викторович,
доктор геолого-минералогических наук;
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской акаде-
мии наук (ИГЭ РАН); лаборатория экзогенной геодинамики и
анализа геологического риска (лаб. № 2); главный научный
сотрудник (г.н.с.)

Владимир Викторович Толмачев,
кандидат технических наук, доцент;
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Нижегородский Государ-
ственный архитектурно-строительный университет, кафедра
ЮНЕСКО, профессор

Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное образователь-
ное учреждение высшего образования «Уральский госу-
дарственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ»)**

Защита диссертации состоится 21 сентября 2017 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.121.01 при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, ауд. 4-73

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета и на интернет-сайте МГРИ-РГГРУ
<http://mgri-rggru.ru/science/protection/>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Российский государственный геологоразведочный университет, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.121.01 С.Д. Гановой

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



С.Д. Ганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что предвидение чрезвычайных ситуаций, в том числе, вызванных развитием экзогенных геологических процессов, представляет собой одну из важнейших задач современности. Она не может решаться без знания закономерностей развития опасных геологических процессов, без понимания их природы, без разработки эффективных способов их прогнозирования. В число этих процессов входит и карст, создающий серьезные хозяйственные проблемы на территории Российской Федерации, прежде всего в Центральном, Приволжском и Уральском федеральных округах.

В настоящее время **в недостаточной степени разработаны** принципы выявления в ходе инженерно-геологических изысканий признаков подготовки карстового провалообразования, хотя на необходимость таких исследований указывают действующие нормативные документы. Данная диссертационная работа в значительной мере устраняет этот недостаток.

Цель диссертации состояла в разработке методики оценки опасности развития покрытого карста, включающей поиск признаков подготовки карстового провалообразования на площадках инженерно-геологических изысканий с помощью специального анализа данных о строении покрывающей толщи, состоянии и составе слагающих ее пород.

Задачи исследований, решение которых требовалось для достижения указанной цели:

- анализ результатов исследований покрывающих пород, выполненных отечественными и зарубежными специалистами с целью оценки карстовой опасности, и соответствующих требований нормативных и методических документов;
- характеристика некоторых особенностей строения покрывающей толщи и слагающих ее дисперсных пород, как предполагаемых признаков подготовки карстового провалообразования, и доказательство правильности этих предположений;
- отработка приемов специального анализа результатов инженерно-геологических изысканий, позволяющих осуществлять поиск и идентификацию признаков подготовки карстового провалообразования;
- отработка способов локализации и картирования признаков подготовки карстового провалообразования;
- разработка принципов построения прогнозной карты карстовой опасности в пределах площадки инженерно-геологических изысканий, выполненных в условиях покрытого карста.

Научная новизна выполненной работы заключается в следующем:

- 1) сформулировано систематизированное представление о ранних признаках подготовки провалообразования в условиях покрытого карста, выражающихся в особенностях строения покрывающей толщи и слагающих ее дисперсных пород;
- 2) с помощью лабораторного физического моделирования изучены феномены изменения гранулометрического состава несвязных дисперсных пород в ходе суффозионного выноса их

частиц в карстовую полость и разупрочнения дисперсных пород над карстовой полостью в процессе подготовки карстового провалообразования;

3) разработаны принципы поиска и идентификации признаков подготовки карстового провалообразования на площадках инженерно-геологических изысканий, в частности, с помощью послойного анализа пространственного распределения показателей статического или динамического зондирования;

4) разработана методика выделения на площадках инженерно-геологических изысканий участков, опасных и потенциально опасных с точки зрения возможности образования карстовых провалов, включающая построение соответствующей прогнозной карты, которая может служить обоснованием для выбора противокарстовых мероприятий.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении существующих представлений о возможностях локального прогнозирования формирования провалов в условиях покрытого карста, а ее **практическая значимость** – в разработке методики такого прогнозирования с использованием несложных приемов обработки стандартных данных, получаемых в ходе инженерно-геологических изысканий.

Методология исследования базируется на принципе детерминизма и представляет собой эмпирическую проверку выдвинутой в прогностических целях гипотезы о ранних признаках подготовки карстового провалообразования, выявляемых в ходе инженерно-геологических изысканий. Существование этих признаков доказывается теоретическими и экспериментальными **методами**. Теоретические доказательства основаны на определенной концепции механизма формирования провала в условиях покрытого карста, рассматривающей возможность подготовки этого события. Экспериментальные доказательства представляют собой: а) результаты лабораторного физического моделирования процессов, подготавливающих карстовое провалообразование; б) отслеживание этих процессов путем анализа данных, полученных в ходе буровых работ, геофизических исследований, статического или динамического зондирования, а также лабораторного определения состава и свойств несвязных пород. Анализ данных инженерно-геологических изысканий используется также для поиска, локализации и картирования участков, опасных с точки зрения возможности образования карстовых провалов, с применением для этих целей некоторых картографических приемов.

На защиту выносятся:

1. Концепция существования признаков подготовки провалообразования в условиях покрытого карста, выражающихся в особенностях строения покрывающей толщи, к которым относятся: а) погребенные карстовые оседания и провалы; б) зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород; в) зоны разупрочнения дисперсных пород над полостями.

2. Принципы поиска и идентификации ранних признаков образования провалов на основе: а) палеогеоморфологического анализа данных буровых работ и геофизических исследований; б) анализа пространственного распределения параметров гранулометрического состава несвязных

грунтов; в) анализа пространственного распределения показателей статического или динамического зондирования.

3. Методика локальной прогностической оценки карстовой опасности, включающая построение карты исследуемой территории, отражающей наличие в ее пределах ранних признаков карстового провалообразования, и принципы выбора противокарстовых мероприятий на основе результатов этой оценки.

Достоверность результатов обеспечена: а) углубленной проработкой публикаций отечественных и зарубежных исследователей, относящихся к теме диссертации; б) значительным объемом проанализированного автором фактического материала, полученного в ходе инженерно-геологических изысканий в Московском регионе, в Нижегородской области и в Республике Башкортостан; в) данными, полученными в ходе лабораторного физического моделирования с использованием специально сконструированного экспериментального оборудования; г) верификацией результатов прогнозирования.

Апробация результатов. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на VII-й Научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (Москва, ОАО «ПНИИС», 2011 г.), 14-х и 15-х Сергеевских чтениях (Москва, ИГЭ РАН им. Е.М. Сергеева, 2012 и 2013 гг.), Российской конференции с международным участием «Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях» (Уфа, 2012 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Геолого-геохимические проблемы экологии» (Москва, ФГУП ИМГРЭ, 2012 г.), 15-й и 17-й Межвузовских конференциях молодых специалистов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, МГСУ, 2012 и 2014 гг.). По теме диссертации опубликованы 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, основной части, включающей 4 главы, заключения и библиографического списка (109 наименований). Работа изложена на 136 страницах текста, содержит 11 таблиц и 75 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования и оценивается степень ее разработанности. Определены цель диссертационной работы и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, научная новизна предложенных решений, а также их теоретическая и практическая значимость. Дана характеристика методологии исследования и методов решения поставленных задач, сформулированы положения, выносимые на защиту. В конечном итоге оценивается степень достоверности полученных результатов, приводятся сведения об их апробации, а также о структуре и объеме диссертации.

В разделе 1 «Состояние вопроса» уточняется, что диссертант придерживается определенных понятий «карст» и «суффозия» данных в СП 116.13330.2012, а под покрывающей толщей он понимает *несцементированные осадочные отложения (дисперсные породы), залегающие выше кровли карстующихся пород, имеющие мощность более 2 метров и генетически не связанные с карстующимися породами*. Карст, развивающийся при наличии в геологическом разрезе покрывающей толщи, именуется покрывным (Г.Н. и В.Н. Дублянские, 2004).

Действующие в настоящее время и использовавшиеся ранее нормативные, инструктивные и методические документы, регламентирующие инженерно-геологические изыскания в карстовых районах, содержат определенные требования к изучению покрывающей толщи, однако они носят общий характер и не ориентируют изыскателей на возможность использования результатов этих исследований для решения конкретных прогностических задач, связанных с оценкой карстовой опасности. Вместе с тем, по мнению многих специалистов, некоторые особенности строения покрывающей толщи, а также состояния, состава и свойств слагающих ее пород могут свидетельствовать о наличии условий, благоприятствующих карстовому провалообразованию, или даже о подготовке этого события.

В нашей стране в этом направлении работали Д.С. Соколов (1962), Н.М. Кухарев (1975), В.П. Хоменко (1976), В.В. Толмачев (1986), В.М. Кутепов и В.Н. Кожевникова (1989), Г.В. Земской и Л.А. Алешина (2003), А.В. Аникеев и М.В. Леоненко (2013), причем А.В. Аникеев в ряде своих работ представил серьезное экспериментальное и теоретическое обоснование необходимости изучения покрывающей толщи для прогноза формирования карстовых провалов. Аналогичных взглядов придерживаются исследовательница из ФРГ Г. Адерхолд (Aderhold, 2005), американские ученые У. Джоу и Б. Бек (Zhou, Beck, 2008), европейские карстоведы Ф. Гутьеррес, Э. Купер и К. Джонсон (Gutiérrez, Cooper, Johnson, 2008). За рубежом особое внимание уделяется использованию различных методов инженерно-геологических изысканий для обнаружения в районах покрытого карста погребенных поверхностных карстопроявлений и ослабленных зон в породах покрывающей толщи, причем и то, и другое воспринимается как предвестники будущего провалообразования. Этому посвящены работы исследователей из разных стран: К. Чэнга и К. Баснета (Chang, Bassnet, 1997), а также Э. Зисмэна (Zisman, 2003, 2008) из США; О. Кауфманна и И. Кинифа (Kaufmann, Quinif, 2001) из Бельгии; К. Эдмондса (Edmonds, 2008) и Дж. Такуела с его коллегами (Tuckwell et al., 2008) из Великобритании. В России В.П. Хоменко (2008), М.В. Леоненко (2013) и О.В. Зеркаль (2015) целенаправленно используют для оценки карстовой опасности результаты статического и динамического зондирования.

В разделе 2 «Особенности покрывающей толщи, указывающие на потенциальную возможность карстового провалообразования» отмечается, что в районах покрытого карста образуются карстовые провалы, о возможности появления которых свидетельствует ряд признаков, выражающихся в особенностях строения покрывающей толщи. К ним в частности отно-

сятся: а) погребенные карстовые оседания и провалы; б) зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород; в) зоны разупрочнения пород покрывающей толщи над полостями.

Погребенные карстовые оседания и провалы представляют собой структурные элементы покрывающей толщи, которые проявляются в специфической конфигурации ее подошвы (она же является кровлей карстующихся пород) и (или) поверхностей контакта между слагающими ее слоями дисперсных пород – маркирующих поверхностей. Это выражается в виде совпадающих в вертикальной проекции замкнутых понижений на маркирующих поверхностях, которых должно быть не меньше двух. Подобная структура, например, явно прослеживается на рисунке 1 в районе скважины № 13. Слой, ограниченный сверху и снизу двумя маркирующими поверхностями (маркирующий горизонт), часто бывает сложен глинистыми грунтами. В процессе формирования древнего поверхностного карстопроявления такой слой мог претерпеть деформации пликативного или дизъюнктивного характера (рис. 2).

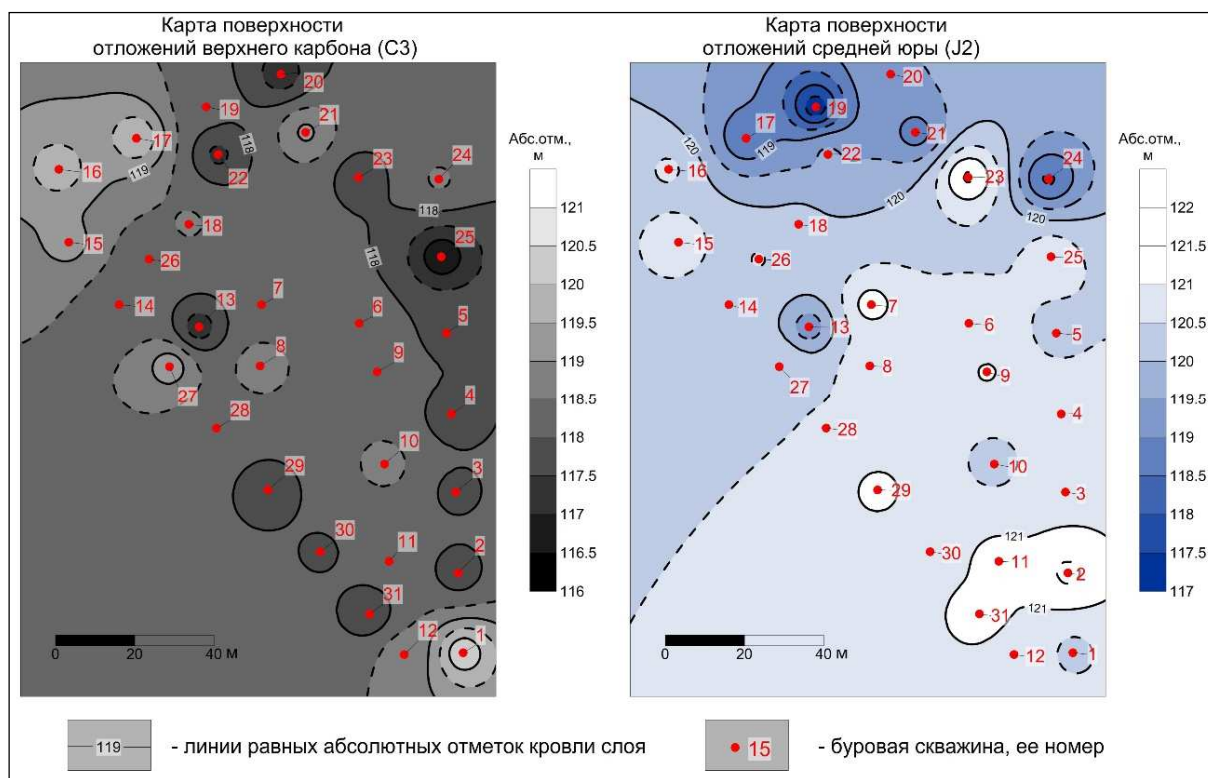


Рисунок 1. Карты маркирующих поверхностей на одном из карстоопасных участков Павшинской поймы (г. Красногорск Московской области): слева кровля карстующихся известняков; справа кровля перерывающих их глин

Присутствие погребенных поверхностных проявлений покрытого карста свидетельствует о возможности новых нисходящих вертикальных подвижек покрывающих пород, вплоть до появления провала, на что указывают известные британские геологи Т. Уолтхэм, Ф. Белл и М. Калшоу (Waltham, Bell & Culshaw, 2005). Кроме того, на периферии таких структур могут существовать сквозные нарушения сплошности водоупора, перекрывающего карстующиеся породы. Такие нарушения создают необходимые предпосылки для развития суффозии, однако обна-

ружить их в ходе инженерно-геологических изысканий не представляется возможным из-за их незначительных размеров в горизонтальном сечении. Наиболее подробно процессы сквозного разрушения экранирующего водоупора были исследованы А.В. Аникеевым (1993).

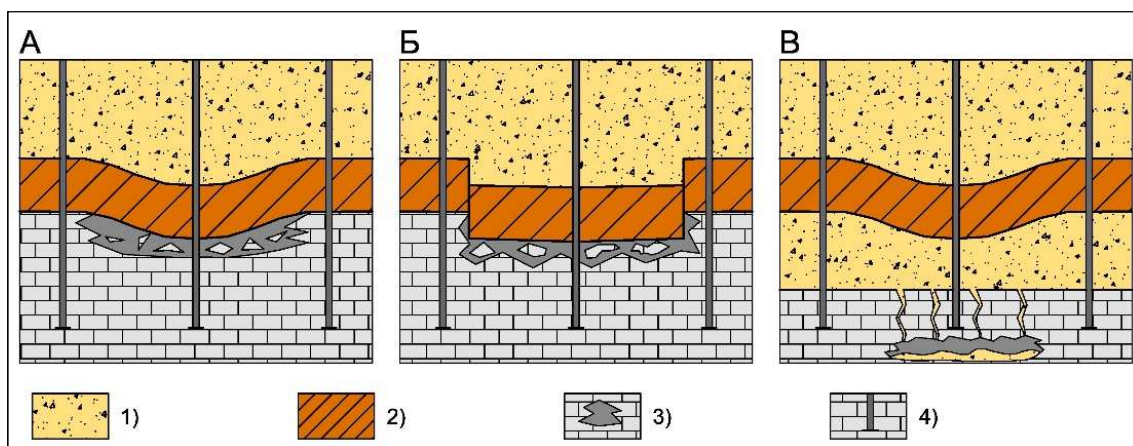


Рисунок 2. Характерные формы маркирующих горизонтов, сложенных глинистыми породами, внутри погребенных поверхностных карстопроявлений: А – маркирующий горизонт, претерпевший пластические деформации (прогиб грунта); Б – маркирующий горизонт, подвергшийся сдвиговым деформациям (обвал грунта); В – маркирующий горизонт, деформированный вследствие карстово-суффозионного процесса

1) несвязные породы; 2) связные глинистые породы (маркирующий горизонт); 3) полость в карстующихся породах; 4) буровая скважина

Зоны суффозионного разуплотнения формируются в нижних слоях покрывающей толщи, сложенных несвязными породами и имеют эллипсовидную форму в плане. Внутри них от периферии к центру наблюдается увеличение пористости, а также снижение процентного содержания мелких фракций или степени неоднородности гранулометрического состава несвязных пород. Наличие таких зон свидетельствует о суффозионном выносе мелких частиц в трещины и полости, присутствующие в карстующихся породах (в том числе через сквозные нарушения сплошности перекрывающего их водоупора). Этот процесс развивается только в так называемых суффозионных грунтах, структурно-текстурные особенности которых, позволяют мелким частицам (заполнителю) свободно перемещаться между крупными частицами (скелетом) под действием фильтрационного потока.

Процесс был смоделирован в лабораторных условиях на упрощенном и уменьшенном рабочем образце экспериментальной установки конструкции В.П. Хоменко, Е.П. Маханько, Е.И. Исаева и др. (рис. 3). Материал модели представлял собой суффозионный грунт: искусственную двухкомпонентную смесь (скелет и заполнитель), состоящую из дресвяного грунта (порядка 85%) и песка средней крупности (до 15%), с коэффициентом пористости 0,67-0,68. Размер частиц заполнителя не превышал 1 мм.



Рисунок 3. Экспериментальное оборудование для моделирования суффозионного выноса частиц несвязных пород в полость

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 шириной 5 мм, имитирующая карстовый канал; 7 – перепускная трубка; 8 – трубки, соединяющие боковые камеры; 9 – дренажные трубки нижней камеры



Рисунок 4. Схема отбора проб материала модели из рабочей камеры экспериментальной установки после проведения опыта (слева) и используемые для этого инструменты (справа)

Эксперимент начинался с заполнения водой боковых камер, из которых, через сетчатые перегородки-фильтры, вода поступала в рабочую камеру и насыщала материал модели. Наполнение камер происходило в течение 5 минут до уровня 15 см, затем в течение 3 минут с помощью перепускной трубки уровень поддерживался на заданной отметке. При этом вода поступала через прорезь из рабочей камеры в нижнюю, вынося частицы грунта. Отток воды из нижней камеры происходил через сливные трубки, не давая камере наполниться до потолка. Спустя 3 минуты, подача воды прекращалась, и происходил ее свободный слив через прорезь до осушения всех камер. После проведения трех циклов «налив – поддержание уровня – слив» из материала модели отбирались пробы на гранулометрический состав (рис. 4). Для каждой из проб определялись два параметра: процентное содержание заполнителя и степень неоднородности.

По результатам эксперимента вначале было проанализировано пространственное распределение в вертикальной плоскости величин обоих параметров, однако для степени неоднород-

ности грунта (C_u) картина оказалась более выразительной. Она показывает практически линейную зависимость этого параметра от расстояния между точкой его замера до входа в полость-приемник (рис. 5). Величина C_u тем меньше, чем ближе находится образец к прорези, поскольку грунт становится более однородным за счет суффозионного выноса заполнителя.

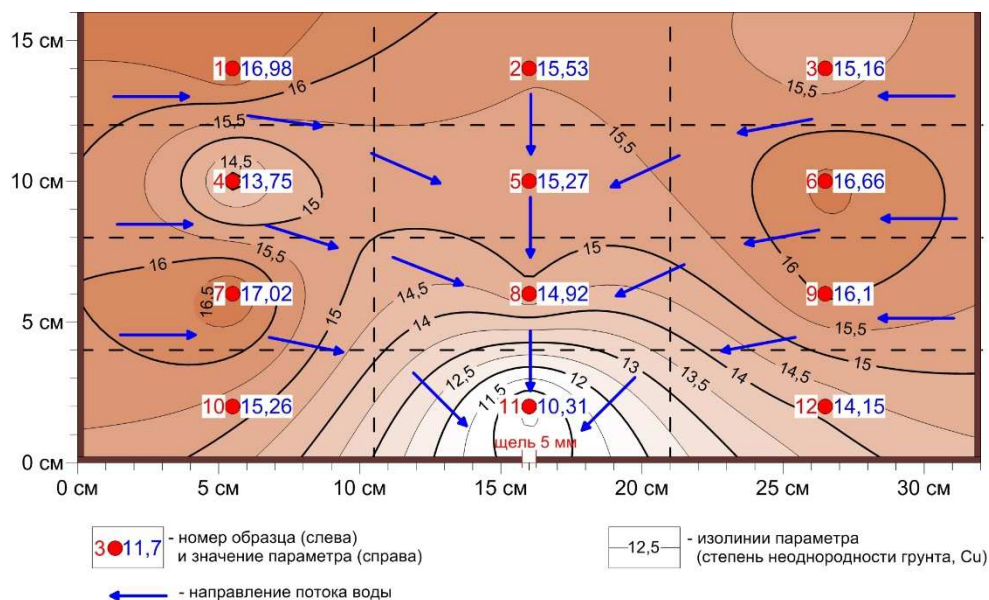


Рисунок 5. Пространственное распределение степени неоднородности (C_u) грунта после проведения опыта

Процесс суффозионного выноса частиц грунта представляет собой лишь начальную стадию провалообразования, относящегося к карстово-суффозионному генетическому типу. Для формирования провала необходим переход к полному фильтрационному разрушению несвязного грунта и последующему нисходящему перемещению разрушенной массы, над которой, как показали исследования В.П. Хоменко (2003) и А.В. Аникеева (2006), происходит обрушение вышележащих грунтов. Таким образом, при отсутствии перекрывающего водоупора (или нарушении его целостности) определенная картина пространственного распределения процентного содержания заполнителя в суффозионном грунте, слагающем нижнюю часть покрывающей толщи, или степени неоднородности его гранулометрического состава может служить прогностическим признаком подготовки карстово-суффозионного провалообразования.

Зоны разупрочнения пород над карстовыми полостями не имеют четких границ и возникают в результате известного феномена: изменения напряженного состояния пород, перекрывающих полость любого происхождения (Аникеев и др., 19991). Связано такое изменение с разрядкой нормальных напряжений в грунтах, перекрывающих полость, причем это происходит не только по контуру полости, но и у поверхности земли. В условиях покрытого карста появление и рост незакольматированной карстовой полости вызывает аналогичный эффект в покрывающих породах. Зоны разупрочнения пород над карстовыми полостями осесимметричны, изменяются во времени и предшествуют обрушению покрывающих пород.

Принципиальная возможность обнаружения зон разупрочнения покрывающих пород над карстовыми полостями с помощью статического и динамического зондирования, ранее доказанная полевыми исследованиями (Хоменко, 2003), была подтверждена экспериментально. Для проведения эксперимента была использована установка, показанная на рисунке 3, но в несколько иной конфигурации (рис. 6). Рабочая камера заполнялась материалом модели, имитирующим покрывающую толщу, а ее дно было оборудовано двойными раздвижными створками, создающими щель необходимой ширины. В щель помещался прямоугольный брусок шириной 3,6 см, выпадение которого имитировало выход карстовой полости на контакт с подошвой покрывающей толщи. Раздвижные створки отделяли рабочую камеру от нижней, игравшей роль потенциальной полости-приемника для материала модели в случае его обрушения.

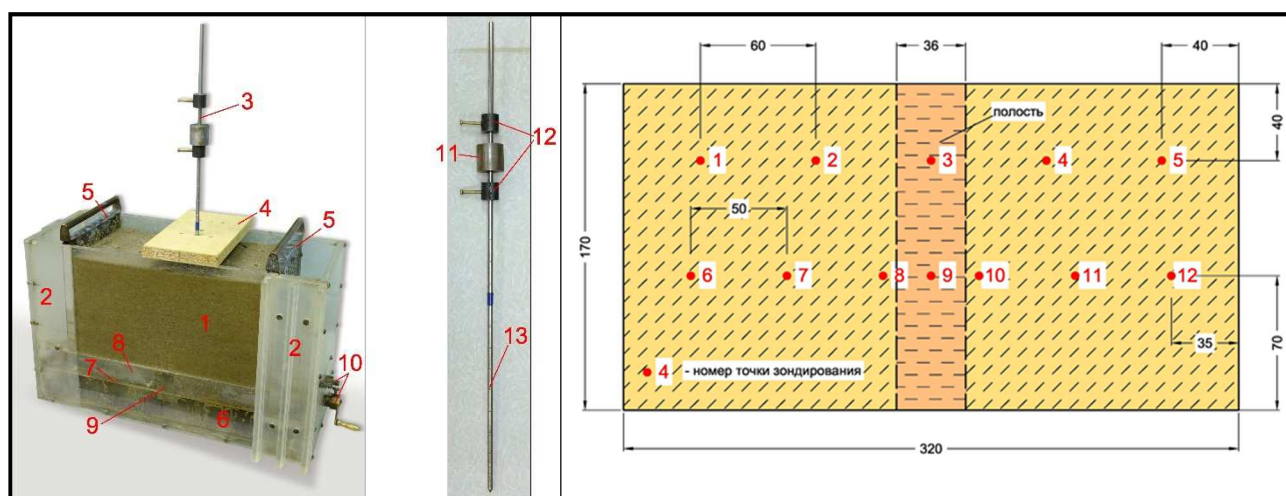


Рисунок 6. Экспериментальное оборудование для моделирования разупрочнения дисперсных пород над полостью и расположение точек микрозондирования (вид сверху). Зондирование в точках №№ 1-5 выполнено до образования щели в дне рабочей камеры, а в точках №№ 6-12 – после этого события (размеры даны в мм)

1 – рабочая камера, заполненная материалом модели; 2 – боковые камеры, не имеющие функциональной нагрузки в данном эксперименте; 3 – микрозонд; 4 – кондуктор; 5 – водопроницаемые перегородки, выполняющие функцию жестких боковых стенок; 6 – нижняя камера; 7 – нижняя створка; 8 – верхняя створка; 9 – выпадающий брусок; 10 – устройства для раздвигания створок. Элементы микрозонда: 11 – молот; 12 – ограничители хода молота; 13 – градуированная рабочая часть зонда

Задачей эксперимента являлось сравнение картин пространственного распределения величины сопротивления материала модели проникновению в него конуса специально сконструированного микрозонда до и после образования щели в дне рабочей камеры. Микрозонд (рис. 6) представлял собой стальной стержень круглого сечения, длиной 50 см и диаметром 6 мм, нижняя часть которого имела форму конуса. Рабочая часть зонда была размечена рисками через каждые 2,5 см (залог). Зонд погружался в грунт посредством ударов «молота» весом 100 г, высота падения которого (3 см), фиксировалась ограничителями. При проведении динамического микрозондирования подсчитывалось количество ударов молота, требуемое для погружения конуса зонда на каждые 2,5 см залога.

Эксперимент начинался с укладки в рабочую камеру материала модели, в роли которого выступал песок средней крупности, однородный, уложенный с плотностью $1,90 \text{ г/см}^3$, степень влажности которого составляла 0,7, а коэффициент пористости – 0,62. Первым этапом эксперимента являлось выполнение микрозондирования в пяти точках, расположенных в один ряд вдоль задней стенки рабочей камеры (рис. 6). Испытание имело целью получение исходной картины распределения показателя зондирования в вертикальной плоскости. Были построены графики зондирования и вертикальный разрез, отражающий картину распределения показателя зондирования до появления щели в дне рабочей камеры. Зондирование показало во всех точках практически одинаковое линейное увеличение количества ударов на залог с глубиной.

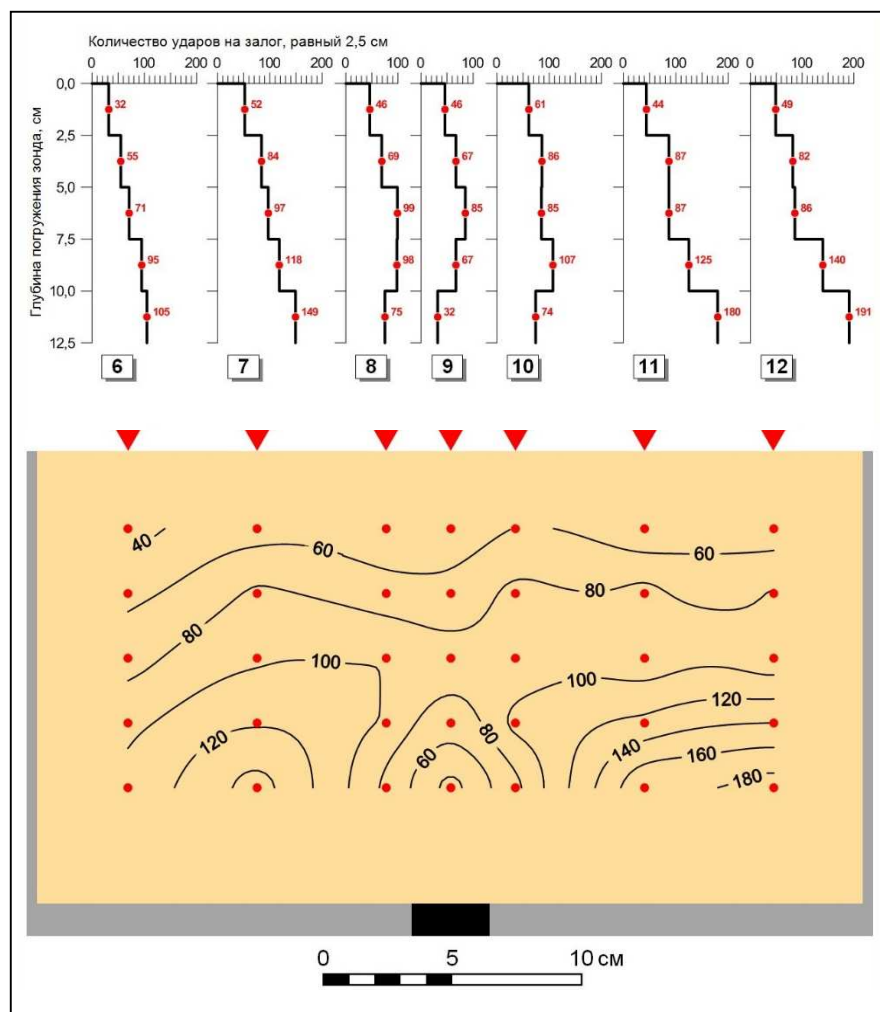
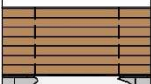
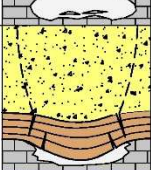
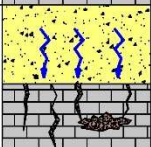
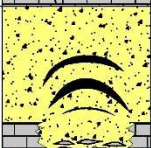
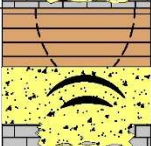


Рисунок 7. Пространственное распределение показателя динамического микрозондирования (количества ударов, затрачиваемое на погружение зонда на 2,5 см) в материале модели после появления щели в дне рабочей камеры (2-й этап эксперимента). В верхней части рисунка показаны графики зондирования, в нижней – изолинии показателя зондирования

На втором этапе имитировался выход карстовой полости на контакт с подошвой покрывающей толщи. Для этого с помощью специального устройства (позиция 10 на рисунке 6) вращением рукоятки раздвигались нижние створки, до выпадения бруска, закрывавшего щель в дне рабочей камеры. При этом вывала материала модели в нижнюю камеру не происходило.

Следующий ряд зондирования, на котором было расположено семь точек, располагался ближе к осевой линии рабочей камеры (рис. 6). Динамическое зондирование начало осуществляться спустя 30 минут после выпадения бруска из щели в дне рабочей камеры. По полученным данным также были построены графики зондирования и вертикальный разрез по точкам испытания (рис. 7). Была выявлена ослабленная зона грунта над образовавшейся полостью, которая четко зафиксирована по картине снижения количества ударов на залог. При этом «полка» подошвы материала модели оставалась в сохранности и не обваливалась в нижнюю камеру в ходе динамического зондирования. Ослабленная зона (зона разупрочнения) характеризуется количеством ударов от 40 до 80, в то время как фоновые значения на этой глубине составляют 120-160 ударов молота на залог. Картина изолиний на рисунке 7 практически идентична картине, полученной в свое время Е.Н. Коломенским (2000) в ходе компьютерного моделирования влияния полости на состояние перекрывающих ее дисперсных пород.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН В ГРУНТАХ ПОКРЫВАЮЩЕЙ ТОЛЩИ, СВЯЗАННЫХ С РАЗВИТИЕМ КАРСТА			
Природа аномалии	Развитие карста		Принципы идентификации типа аномалии
РАЗУПРОЧ- НЕНИЕ	появление и рост карстовой полости		по наличию и характеру залегания водоупора перекрывающего полость и по картине изменения сопротивления грунта при зондировании
	прогибание водоупора в карстовую полость		
РАЗУПЛОТ- НЕНИЕ	суффозионный вынос частиц грунта в трещины и полости карстующихся пород		по изменчивости гранулометрического состава и по картине изменения сопротивления грунта при зондировании
	формирование карстового провала на стадии подземного обрушения		по характеру кривых зондирования
РАЗУПЛОТ- НЕНИЕ И РАЗУПРОЧ- НЕНИЕ	обрушение карстовой полости при наличии водоупорного слоя в покрывающей толще		по наличию и характеру залегания водоупора перекрывающего полость и по характеру кривых зондирования

Условные обозначения:

-  покрывающие несвязные грунты
-  покрывающие связные грунты
-  карстующиеся породы
-  инфильтрация грунтовых вод
-  участки снижения сопротивления грунта при зондировании
-  своды обрушения в несвязных грунтах

Рисунок 8. Генетические типы ослабленных зон в районах покрытого карста, связанных с его развитием, и принципы их идентификации

Таким образом, с помощью специального анализа результатов статического или динамического зондирования можно определить некоторую ограниченную область на земной поверхности, в пределах которой появится будущий карстовый провал, когда разупрочнение покрывающих пород над полостью сменится их обрушением в полость. Результаты опытов свиде-

тельствуют еще и о том, что имитируемый процесс может не иметь отношения к карсту, поскольку процесс растворения на модели не воспроизводился, и имитируемая полость-приемник может иметь любое, в том числе, и техногенное происхождение. Ранее диссертантом в качестве своего рода натурного эксперимента было проведено исследование провала грунта, образовавшегося при прокладке подземного коллектора методом микротоннелирования (Крашенинников, 2011), и при этом были получены аналогичные результаты.

Вообще же, в грунтах покрывающей толщи формируются ослабленные зоны разного происхождения, которые могут быть обнаружены с помощью статического или динамического зондирования (рис. 8).

В разделе 3 «Поиск и идентификация признаков подготовки карстового провалообразования» изложены основные принципы такого поиска, осуществляемого путем специального анализа данных инженерно-геологических изысканий. На конкретных примерах показана необходимость комплексного подхода к поиску и идентификации искомых признаков, которые должны осуществляться во взаимном сопоставлении признаков, выявляемых разными методами, и требует дополнительного анализа всей имеющейся информации о геологической среде.

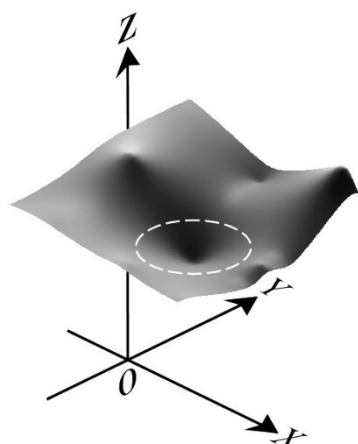


Рисунок 9. Схема, иллюстрирующая основной принцип поиска признака подготовки карстового провалообразования: выявление замкнутой депрессии на трехмерной поверхности, построенной с помощью интерполяции дискретных значений параметра, характеризующего искомый признак (X , Y – прямоугольные координаты на горизонтальной плоскости; Z – величина параметра)

Таблица 1. Информация, используемая при поиске и идентификации признаков подготовки карстового провалообразования

Искомые признаки подготовки карстового провалообразования	Величина Z , замеренная или рассчитанная в точке с координатами X и Y (см. рисунок 9)	Дополнительные обстоятельства, усиливающие достоверность идентификации
Погребенные карстовые оседания или провалы	Абсолютная отметка подошвы слоя, выбранной в качестве маркирующей поверхности	Наложение на выявленную депрессию любой геофизической аномалии
Зоны суффозионного выноса частиц несвязных пород в карстовые трещины и полости	Процентное содержание мелких фракций в несвязном грунте или степень неоднородности его гранулометрического состава	Наложение на выявленную депрессию депрессионной воронки на поверхности надкарстовых вод
Зоны разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями	Осредненное по глубине сопротивление грунта конусу при статическом или динамическом зондировании	Совпадение депрессий, выявленных в разных диапазонах глубин или для разных слоев

Поиск признаков подготовки карстового провалообразования представляет собой целенаправленное изучение конфигурации трехмерных поверхностей, ограничивающих слои горных пород, которые составляют покрывающую толщу, и полей параметров, характеризующих состав и свойства этих пород, которые в графическом выражении также представляют собой трехмерные поверхности. На них ищут замкнутые депрессии (рис. 9), поскольку для выявления любого из искомым признаков интерес представляет локальное уменьшение величины параметра, характеризующего этот признак, по сравнению с некоторым «фоном».

В таблице 1 дана краткая характеристика численно выражаемых параметров, пространственное распределение которых анализируется при поиске и идентификации признаков подготовки карстового провалообразования. Некоторые из этих параметров могут представлять собой результат предварительной математической обработки прямых данных, получаемых в ходе: а) буровых работ; б) определения гранулометрического состава грунтов, отобранных из скважин; в) статического или динамического зондирования грунтов.

Далее в разделе 3 на примере карстоопасной территории, расположенной на южной окраине г. Уфы, показана эффективность комплексного использования буровых работ и геофизических исследований (наземных и скважинных) для поиска погребенных поверхностных карстопроявлений. Совместное применение этих методов позволяет с большой достоверностью определять конфигурацию маркирующих поверхностей, обнаруживать на них замкнутые понижения и оценивать состояние пород внутри этих форм. Сделан вывод о том, что перечисленные операции являются главным инструментом палеогеоморфологического анализа, с помощью которого осуществляется поиск и идентификация погребенных карстовых провалов и оседаний.

Анализ пространственного распределения параметров гранулометрического состава водонасыщенных песков на участке двух карстово-суффозионных провалов, образовавшихся в 1969 году на северо-западе г. Москвы (рис. 10), позволил обнаружить закономерное снижение содержания в песках пылевато-глинистых частиц и степени неоднородности их гранулометрического состава по мере приближения к зоне провалов. Кроме того, в восточной части участка обнаружена зона аналогичных изменений. Сделан вывод о том, что принципиальная возможность и эффективность поиска зон суффозионного выноса частиц несвязных пород в карстовые трещины и полости определяется полнотой опробования этих пород в ходе буровых работ.

Поиск зон разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями осуществляется путем анализа площадного распределения осредненной по глубине величины сопротивления конусу, рассчитанному для каждой точки статического или динамического зондирования. Этот показатель целесообразно определять для отдельных слоев по всей их мощности или для однородных толщ грунтов с выделением определенных интервалов глубин осреднения, как это было сделано на карстоопасном участке, расположенном в г. Красногорске Московской области. Среди обнаруживаемых таким образом ослабленных зон различного происхождения следует идентифицировать искомые зоны разупрочнения.

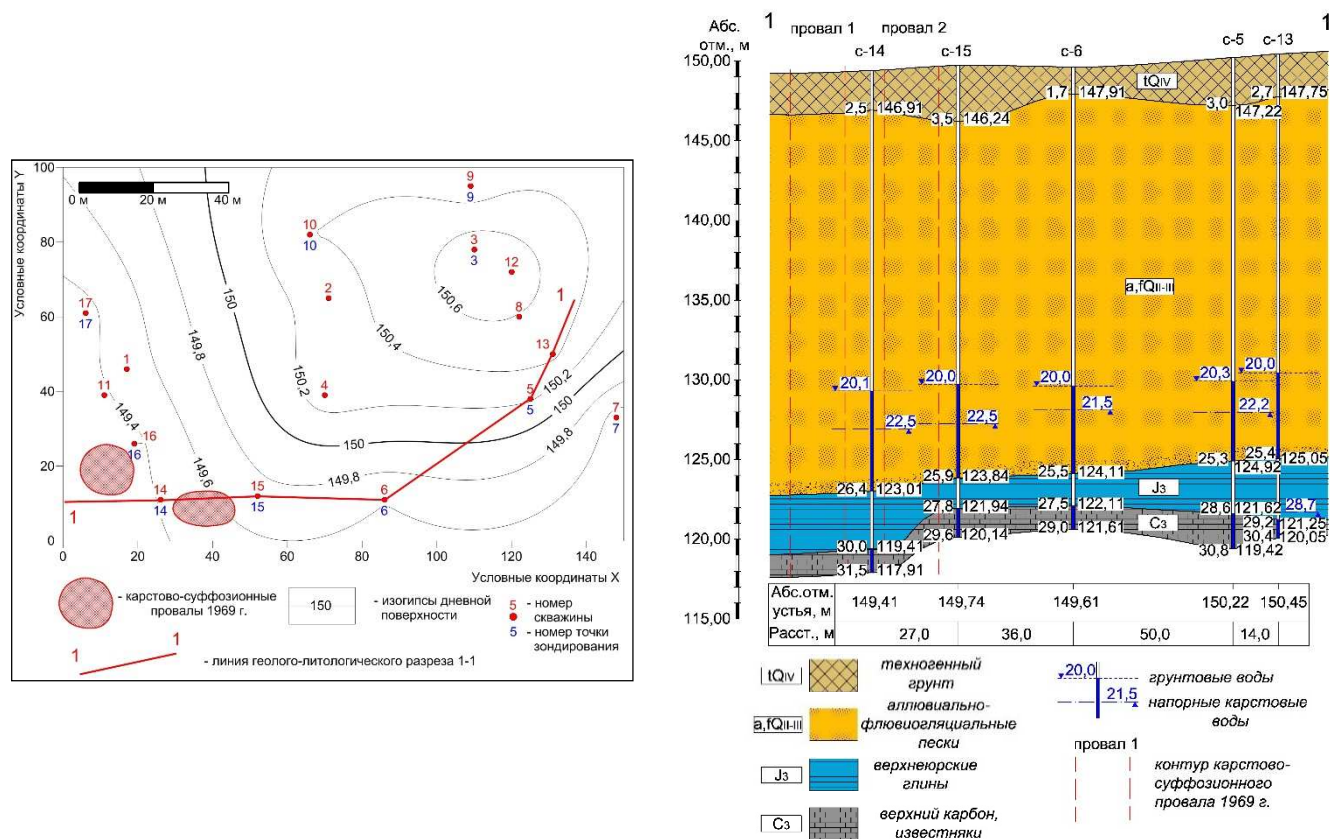


Рисунок 10. Карта фактического материала инженерно-геологических изысканий, выполненных на исследуемом участке в г. Москве, и схематический геолого-литологический разрез по линии 1-1

Сопоставление данных технологически однотипного статического или динамического зондирования, осуществленного на одной территории в разные годы, значительно расширяет возможности поиска и генетической идентификации зон разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями, поскольку дает возможность анализировать изменение состояния пород покрывающей толщи не только в пространстве, но и во времени. Это показано на примере площадки Игумновской ТЭЦ, расположенной в г. Дзержинске Нижегородской области, на территории активного развития покрытого карста.

В разделе 4 «Методика локальной прогностической оценки карстовой опасности» продемонстрированы приемы осуществления оценки карстовой опасности, в основу которой положены поиск и идентификация признаков ожидаемого карстового провалообразования в пределах конкретного участка инженерно-геологических изысканий (рис. 10). Участок расположен на северо-западе г. Москвы и кратко охарактеризован в разделе 3. Для поиска в пределах исследуемого участка погребенных поверхностных карстопроявлений на основе данных бурения, были построены карты трех маркирующих поверхностей (рис. 11). Их анализ позволил выявить две депрессии, которые можно уверенно идентифицировать как погребенные карстовые оседания или провалы. Одна из этих форм расположена в районе скважин №№ 14-16 и, по видимому, представляет собой результат позднейшего «оживления» погребенного среднечет-

вертикального карстового провала. Вторая форма, не имеющая признаков унаследованности, находится в районе скважины № 9.

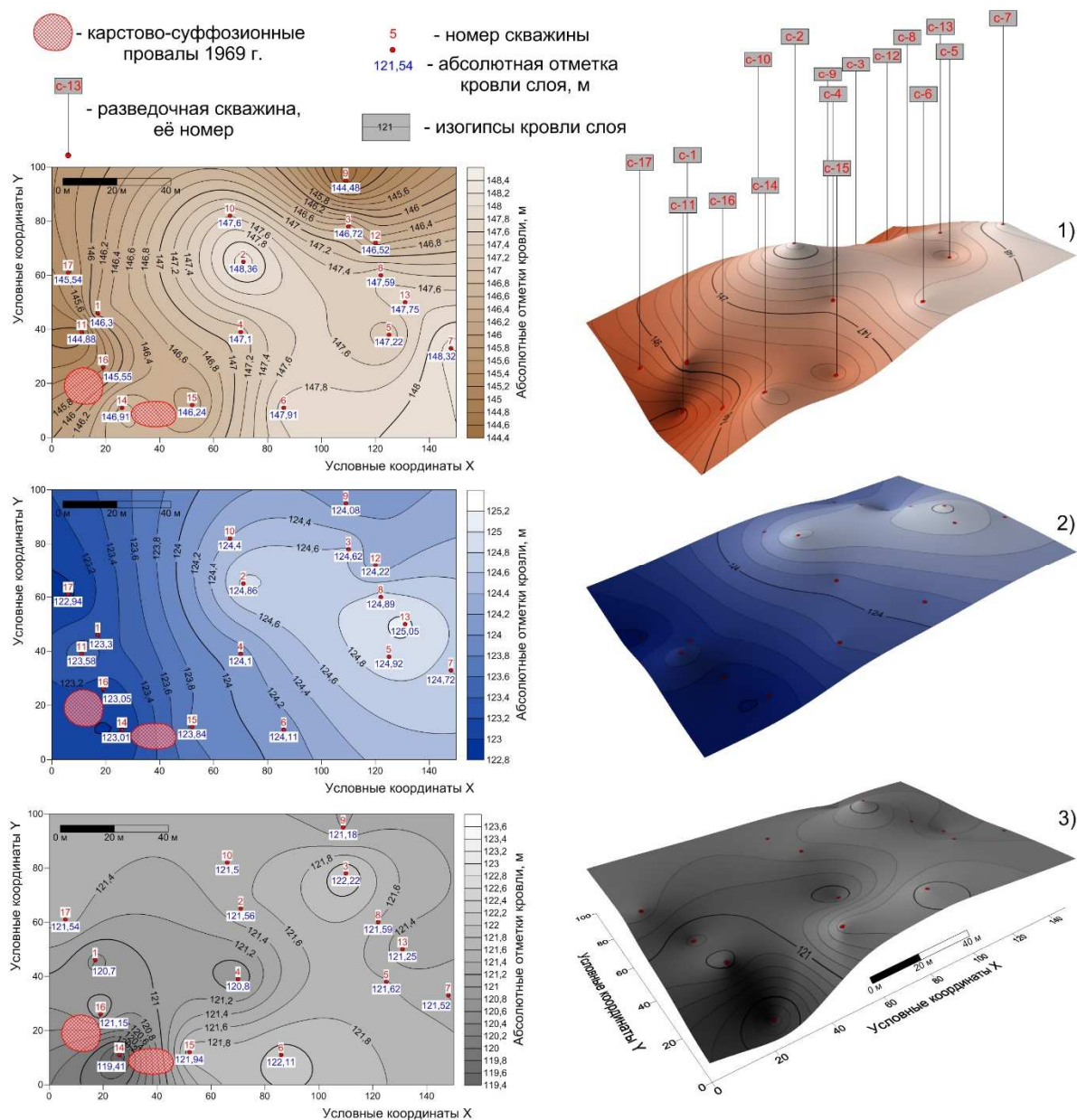


Рисунок 11. Конфигурация стратиграфических границ, принятых в качестве маркирующих поверхностей при поиске на исследуемом участке погребенных карстовых оседаний и провалов: 1) рельеф кровли верхнечетвертичных отложений; 2) рельеф кровли верхнеюрских отложений; 3) рельеф кровли верхнекаменноугольных отложений

Поиск зон суффозионного разуплотнения осуществлялся путем анализа данных о гранулометрическом составе водонасыщенных четвертичных песков, толща которых представлена двумя слоями. Первый (верхний) слой сложен песками мелкими, реже пылеватыми, а второй (нижний) – песками средней крупности, реже крупными и гравелистыми. Анализ распределения показателей гранулометрического состава водонасыщенных песков в горизонтальной плоскости осуществлялся в привязке к определенным диапазонам глубин их залегания: 22,0-23,5 м для первого слоя и 24,0-25,5 м для второго.

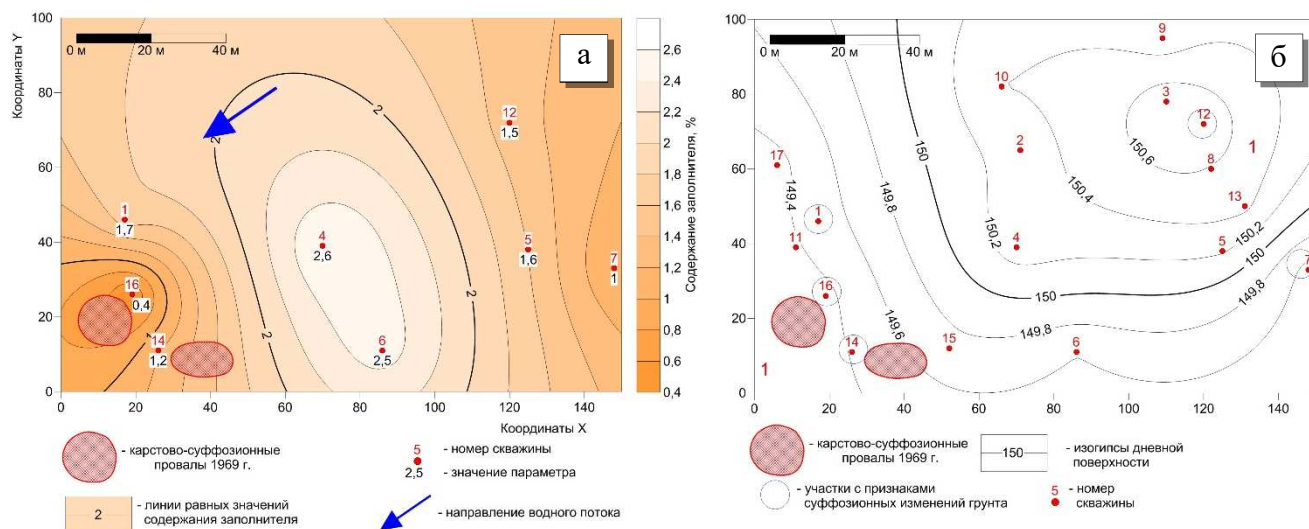


Рисунок 12. Карта-схема пространственного распределения в пределах исследуемого участка процентного содержания заполнителя в водонасыщенных песках первого слоя (а) и результаты поиска на участке зон суффозионного выноса частиц из обоих слоев песчаных пород в трещины и полости (б)

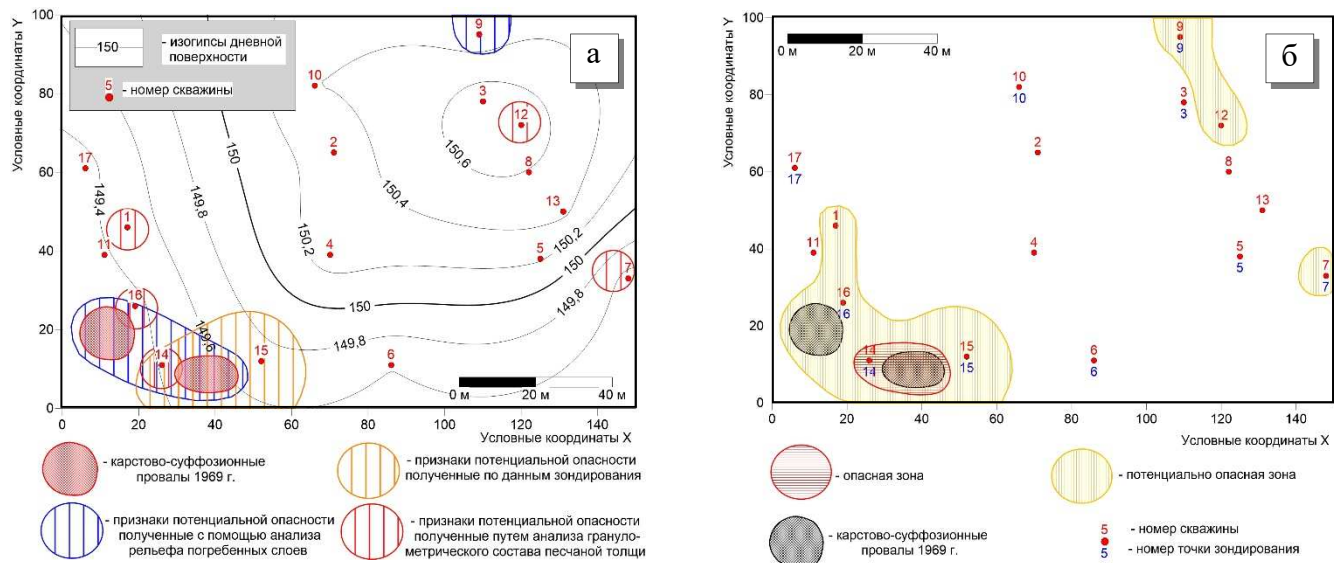
В песках обоих слоев заполнителем являются частицы размером менее 0,01 мм. Были построены четыре карты-схемы, отражающие пространственное распределение процентного содержания заполнителя в водонасыщенных песках и коэффициента неоднородности их гранулометрического состава отдельно для каждого слоя, одна из которых показана на рисунке 12а. Анализ этих карт позволил выявить на исследуемом участке несколько зон с признаками суффозионных изменений: это – районы скважин №№ 1, 14, 16 и скважин №№ 7 и 12 (рис. 12б).

Для изучения в пределах участка пространственного распределения лобового сопротивления грунта конусу зонда был выбран интервал глубин 3,8-10,8 м. При обработке данных статического зондирования диссертант применил метод послойного анализа (Крашенинников, 2014). Исследуемый интервал глубин был разделен на равные метровые отрезки, что позволило: а) более точно определять местоположение ослабленных зон в плане; б) определять условия распространения этих зон в грунтовой толще по глубине; в) получить сравнительную оценку точек зондирования по содержанию в каждой из них ослабленных интервалов. Были построены карты распределения показателя среднего лобового сопротивления конусу (q), рассчитанного для всего исследуемого интервала глубин (рисунок 13а) и для каждого интервала в отдельности.

На рисунке 13а можно видеть, что минимальные значения параметра q наблюдаются в юго-западной части площадки, вблизи первого карстово-суффозионных провала 1969 года, в районе точек зондирования №№ 14 и 15 (средние значения составляют 8,2 и 7,1 МПа, соответственно). Северо-восточнее второго провала, снижение величины q не столь выражено: в районе точки зондирования № 16 она равна 11,9 МПа, что примерно соответствует «фону».

двух таких признаков (скважины и точки статического зондирования №№ 1, 9, 11, 12, 15 и 16). Вблизи скважины №14 присутствуют все три признака возможного провалообразования.

Оценка карстовой опасности осуществляется по следующим критериям: 1) при наличии на каком-либо участке территории всех трех признаков возможного образования карстового провала участок оценивается как **опасный**; 2) при наличии одного или двух таких признаков – как **потенциально опасный**; 3) при отсутствии признаков – как участок **без признаков подготовки карстового провалообразования**. Итогом оценки является составленная с учетом указанных выше критериев опасности прогнозная карта потенциальной возможности карстового провалообразования (рис. 14б).



данных статического зондирования, и идентифицированной как зона разупрочнения песчаных пород над карстовой полостью, действительно обнаружила эту полость в зоне аэрации.

Таблица 2. Рекомендации по применению противокарстовых мероприятий при наличии признаков подготовки карстового провалообразования, обнаруженных в ходе предлагаемой локальной прогностической оценки карстовой опасности:

Противокарстовые мероприятия		Признаки подготовки карстового провалообразования		
		Погребенные карстовые оседания и провалы	Суффозионное разуплотнение не связных пород	Разупрочнение дисперсных пород над полостями
Планировочные	Расположение зданий и сооружений на менее опасных участках			
	Другие			
Водозащитные	Ограничение объемов откачки подземных вод			
	Другие			
Противофильтрационные				
Геотехнические	Тампонирувание карстовых полостей и трещин			
	Опираение фундаментов на надежные незакарстованные грунты посредством свай			
	Другие			
Конструктивные				
Технологические				
Эксплуатационные	Мониторинг компонентов природно-технической геосистемы, установка сигнальных систем			
	Другие			
Провоцирующие*	Искусственное обводнение грунтов			
	Динамические воздействия на грунты			
* не предусмотрены СП 116.13330.2012				
Применение данного мероприятия при наличии данного признака:				
	целесообразно и эффективно			
	возможно при осторожном осуществлении и надежном обосновании			
	возможно при наличии данного признака, но нежелательно в зоне его проявления			
	не зависит от наличия или отсутствия данного признака			

В заключительной части раздела 4 показано, что синтетическая карта территории с выделенными зонами проявления признаков подготовки карстового провалообразования может послужить инженерно-геологическим обоснованием выбора противокарстовых мероприятий (табл. 2). Это касается планировочных, водозащитных, геотехнических, эксплуатационных и провоцирующих мероприятий, хотя в нашей стране отсутствует широкий опыт применения по-

следних. При этом можно утверждать, что такое геотехническое противокарстовое мероприятие, как опирание фундаментов на надежные незакарстованные грунты посредством свай, хотя и возможно при наличии погребенных карстовых оседаний и провалов и (или) разупрочнения покрывающих пород над полостями, но нежелательно в зонах проявления этих признаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существуют признаки подготовки карстового провалообразования, которые в районах покрытого карста выражаются в особенностях строения покрывающей толщи в виде специфических форм залегания слагающих ее пород, а также в их особом состоянии и составе, которые обычно принимают вид некоторых структурных элементов массива. К таким признакам относятся: а) погребенные поверхностные проявления покрытого карста (оседания и провалы), б) зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород и в) зоны разупрочнения дисперсных пород над полостями.

2. Погребенные оседания и провалы являются признаками подготовки карстового провалообразования, потому что они могут «наследоваться» и «оживляться» за счет нисходящего движения перекрывающих их дисперсных пород. С другой стороны, в условиях, когда карстующиеся породы перекрыты водоупорным слоем, сложенным глинистыми породами, он, как правило, бывает разрушен внутри погребенного карстового провала (и даже оседания), особенно в его периферийной части. Через субвертикальные нарушения сплошности водоупора может происходить суффозионный вынос перекрывающих его несвязных пород в карстовые трещины и полости, что способно вызвать образование нового провала. Обнаружить и идентифицировать погребенные карстовые оседания и провалы можно, анализируя результаты буровых и геофизических работ путем изучения конфигурации литолого-стратиграфических границ между слоями горных пород, слагающих покрывающую толщу.

3. Зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород покрывающей толщи представляют собой результат закономерного изменения их гранулометрического состава в результате суффозионного выноса их мелких частиц в карстовые трещины и полости. Формируются такие зоны только в так называемых суффозионных грунтах, состоящих из неподвижных частиц (скелета) и выносимых подвижных частиц (заполнителя), и эта особенность грунта оценивается, согласно специальным критериям. Поиск и идентификация зон суффозионного разуплотнения осуществляются с помощью анализа пространственного распределения процентного содержания в несвязных грунтах, отобранных из скважин, заполнителя или степени неоднородности их гранулометрического состава. Наличие таких зон свидетельствует о начале первой стадии суффозионного процесса, вызывающего образование карстово-суффозионных провалов.

4. Результаты статического или динамического зондирования дисперсных пород, слагающих покрывающую толщу, позволяют находить в них «ослабленные» зоны, в которых сопро-

тивление грунта проникновению конуса аномально снижено по сравнению с «фоновыми» величинами. Такие зоны могут иметь разное происхождение и в частности могут представлять собой результат закономерного разупрочнения грунта над карстовой полостью, вследствие изменения его напряженного состояния. Через некоторое время над этой полостью, никак не проявленной на земной поверхности, может образоваться провал. Если такую зону разупрочнения удастся уверенно идентифицировать, она должна восприниматься как отчетливый симптом будущего провалообразования, что подтверждается известными фактами.

5. Все три перечисленных признака при их выявлении отображаются на синтетической карте в виде зон, которые могут накладываться друг на друга. Окончательным результатом локальной прогностической оценки карстовой опасности, базирующейся на изложенных выше принципах, является прогнозная карта с выделением опасных и потенциально опасных участков с точки зрения возможности образования карстовых провалов. Информация, представленная на обеих этих картах, может послужить хорошим инженерно-геологическим обоснованием для рационального выбора некоторых противокарстовых мероприятий.

По мнению диссертанта, для дальнейшего усовершенствования предложенной им методики необходимо разработать строгие математические критерии определения пространственных границ зон, внутри которых проявляются признаки подготовки карстового провалообразования. Несомненный интерес представляло бы и физическое моделирование поведения покрывающих пород над погребенными карстовыми провалами и оседаниями под действием различных факторов природного и техногенного происхождения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. 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.
2. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 6-8.
3. Крашенинников В.С. Формирование ослабленных зон над карстовой полостью (экспериментальное подтверждение) // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 42-45.
4. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Изменение гранулометрического состава несвязных грунтов, предшествующее карстово-суффозионному провалообразованию // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 52-62.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

5. Крашенинников В.С. Опыт использования динамического зондирования при обследовании провала грунта, вызванного техногенными факторами // Инженерные изыскания в строительстве. Сборник трудов VII Научно-практической конференции молодых специалистов. ПНИИИС. М.: ПНИИИС, 2011. С. 88-92.

6. Крашенинников В.С. Выявление особенностей покрывающей толщи с целью оценки карстового провалообразования на примере одной из площадок, расположенной в СЗАО г. Москвы // Геолого- геохимические проблемы экологии: Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции (Москва, 26-27 апреля 2012 г.). - М.: ИМГРЭ, 2012. С. 67-68.
7. Крашенинников В.С. Оценка опасности карстового провалообразования на одном из участков Павшинской поймы в Московской области // Строительство-формирование среды жизнедеятельности. Сборник трудов 15-й Межвузовской конференции молодых специалистов. МГСУ. Москва. 2012. С. 627-630.
8. Крашенинников В.С. Применение палеоструктурного анализа для изучения условий формирования карстовых провалов в районе Дзержинской ТЭЦ // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях. Материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 194-199.
9. Крашенинников В.С. Статическое зондирование как один из инструментов оценки карстовой опасности // Сергеевские чтения. Роль инженерной геологии и изысканий на предпроектных этапах строительного освоения территорий. Выпуск 14. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22-23 марта 2012 г.). М.: РУДН, 2012. С. 40-44.
10. Крашенинников В.С. О формировании ослабленных зон в грунтах покрывающей толщи в районах развития карста // Сергеевские чтения. Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты). Выпуск 15. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (21-22 марта 2013 г.). М.: РУДН, 2013. С. 152-156.
11. Крашенинников В.С. Методика оценки карстоопасности на локальном участке, расположенном в САО г. Москвы // Строительство – формирование среды жизнедеятельности. Сборник трудов 17-й Межвузовской конференции молодых специалистов. МГСУ. Москва. 2014. С. 376-381.