

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(НИУ МГСУ).

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

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

Москва 2017 г.

Оглавление

Введение.....	4
1. Состояние вопроса	7
1.1. Определение понятий.....	7
1.2. Требования к исследованию покрывающей толщи для оценки карстовой опасности, содержащиеся в нормативных и методических документах	9
1.3. Результаты исследований покрывающей толщи для оценки карстовой опасности, выполненных отечественными и зарубежными специалистами	12
1.4. Выводы	19
2. Особенности покрывающей толщи, указывающие на потенциальную возможность карстового провалообразования	21
2.1. Необходимые условия, причины и признаки подготовки карстового провалообразования	21
2.2. Погребенные карстовые оседания и провалы.....	26
2.2.1. <i>Описание феномена и способы его выявления</i>	26
2.2.2. <i>Роль феномена в возможном формировании новых карстовых провалов.....</i>	32
2.3. Изменение гранулометрического состава несвязных дисперсных пород, вызванное суффозионным выносом их частиц в трещины и полости.....	35
2.3.1. <i>Описание процесса и необходимых условий его развития</i>	35
2.3.2. <i>Процесс, как начальная стадия формирования карстово-суффозионного провала</i>	40
2.3.3. <i>Экспериментальные исследования суффозионного изменения гранулометрического состава несвязных дисперсных пород</i>	43
2.4. Разупрочнение дисперсных пород над карстовой полостью	48
2.4.1. <i>Описание процесса и признаки его развития</i>	48
2.4.2. <i>Процесс, как подготовка обрушения дисперсных пород над карстовой полостью.....</i>	51
2.4.3. <i>Подтверждение феномена экспериментальными данными.....</i>	54
2.5. Выводы	59
3. Поиск и идентификация признаков подготовки карстового провалообразования.....	61
3.1. Основные принципы	61

3.2. Поиск погребенных карстовых оседаний и провалов.....	63
3.2.1. <i>Некоторые общие положения</i>	63
3.2.2. <i>Краткая геологическая характеристика исследуемой территории</i>	64
3.2.3. <i>Анализ данных разведочного бурения</i>	71
3.2.4. <i>Анализ геофизических данных</i>	73
3.3. Поиск зон суффозионного выноса частиц несвязных пород в трещины и полости.....	79
3.3.1. <i>Обеспеченность поиска исходными данными</i>	79
3.3.2. <i>Краткая геологическая характеристика исследуемого участка</i>	80
3.3.3. <i>Анализ пространственного распределения параметров гранулометрического состава песчаных пород</i>	81
3.4. Поиск зон разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями.....	88
3.4.1. <i>Краткая геологическая характеристика исследуемого участка</i>	88
3.4.2. <i>Анализ пространственного распределения показателей статического и динамического зондирования</i>	92
3.4.3. <i>Возможности прослеживания изменения во времени картины разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями</i>	99
3.5. Выводы	104
4. Методика локальной прогностической оценки карстовой опасности	106
4.1. Прогностическая оценка потенциальной возможности образования карстовых провалов в пределах площадки инженерно-геологических изысканий.....	106
4.1.1. <i>Построение прогнозной карты потенциальной возможности карстового провалообразования</i>	106
4.1.2. <i>Верификация предлагаемых прогностических решений</i>	116
4.2. Учет результатов прогноза при выборе противокарстовых мероприятий	120
4.3. Выводы	124
Заключение	126
Список литературы	128

Введение

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 серьёзные 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 от-

носятся: 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 3 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.

1. Состояние вопроса

1.1. Определение понятий

С момента возникновения карстоведения, как особой отрасли знаний, было предложено несколько десятков определений понятия «карст» [72]. Карст рассматривался как явление, как процесс и как совокупность того и другого [16]. В настоящей работе автор придерживается определения этого понятия, приведенного в своде правил СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения» [18], согласно которому **карст** – это «комплексный геологический процесс, обусловленный растворением подземными и (или) поверхностными водами горных пород, проявляющийся в их ослаблении, разрушении, образовании пустот и пещер, изменении напряженного состояния пород, динамики, химического состава и режима подземных вод, в развитии суффозии (механической и химической), эрозий, оседаний, обрушений и провалов грунтов, и земной поверхности».

Помимо определения понятия «карст», в СП 116.13330.2012 даны определения понятий «суффозия» и «карстово-суффозионные процессы», которых также придерживается диссертант. Согласно этим определениям **суффозия** представляет собой «разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и сцементированных обломочных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов», а **карстово-суффозионные процессы** – «взаимосвязанное развитие карстового процесса и суффозии».

В настоящее время существует несколько классификаций карста по разным признакам. Основные из них, и наиболее значимые для инженерной геологии, разделяют карст по литологическому составу карстующихся пород и по условиям залегания карстующихся пород относительно земной поверхности.

В конце 19-го века, французским исследователем Э.А. Мартелем [96] карст, был описан как «явление в известняках». Однако позже, в 20-м веке, выяснилось, что карстовые процессы развиваются не только в карбонатных породах, но также в сульфатах и галоидах. Таким образом, к настоящему моменту сформировалось представление об основных литологических типах карста: карбонатном, сульфатном и соляном. При этом очень часто в качестве самостоятельного подтипа рассматривается меловой карст.

Такое разделение карста по типу карстующихся пород, предложенное в 1963 году Г.А. Максимовичем [61], закреплено и в некоторых современных нормативных и рекомендательных документах [10, 16, 69]. Здесь автор привел основную, общепринятую классификацию, однако всего в литературе упоминается более 30 типов и подтипов карста, выделяемых по литологиче-

скому составу карстующихся пород. Среди них выделяются: карст в известковых туфах, магнетитах, соде, железистых кварцитах [61], силикатный, флишевый, рудный [72] и др.

По характеру отложений, перекрывающих карстующиеся породы, выделено более 40 типов карста. В России чаще всего используются классификации, предложенные Г.А. Максимовичем [61] и Н.А. Гвоздецким [33]. Они во многом схожи между собой. Заслуживает, также, внимания классификация, предложенная Г.Н. Дублянской и В.Н. Дублянским [35, 37], которой придерживается диссертант (рисунок 1.1). Она хорошо коррелируется с вышеупомянутыми классификациями, а ее авторы подходят к рассмотрению вопроса с инженерно-геологических позиций. В классификации В.Н. и Г.Н. Дублянских выделено 4 типа карста: открытый, покрытый, перекрытый и перекрыто-покрытый.

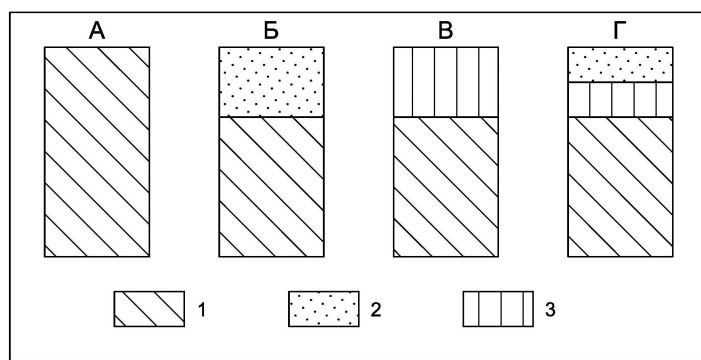


Рисунок 1.1. Типы карста, выделяемые Г.Н. и В.Н. Дублянскими [37] по характеру покровных отложений: А – открытый; Б – покрытый; В – перекрытый; Г – перекрыто-покрытый. Породы: 1 – карстующиеся; 2 – осадочные несцементированные; 3 – осадочные сцементированные, магматические и метаморфические

При **открытом** карсте карстующиеся породы выходят на земную поверхность или покрыты осадочными несцементированными отложениями мощностью до 2 метров, а при **покрытом** карсте их мощность превышает 2 м. В условиях **перекрытого** карста над карстующимися породами залегают только сцементированные осадочные, магматические или метаморфические породы различной мощности, а в условиях **перекрыто-покрытого** карста эти породы чередуются с осадочными несцементированными отложениями.

Применительно к покрытому карсту часто употребляется термин «покрывающая толща», однако он не имеет точного определения. Исходя из представлений Г.Н. и В.Н. Дублянских, автор предлагает следующее определение этого понятия: **покрывающая толща** – это несцементированные осадочные отложения (дисперсные породы), залегающие выше кровли карстующихся пород, имеющие мощность более 2 метров и генетически не связанные с карстующимися породами.

Одной из характерных особенностей грунтов покрывающей толщи является возможность формирования в ней так называемых ослабленных зон, о чем говорится в некоторых методических документах [10, 12] и другой нормативной и научной литературе. Основываясь на описании ослабленных зон, приведенном в этих документах, и немного дополнив его, можно дать

определение этого понятия: **ослабленная зона** – это локальный участок в грунтах покрывающей толщи, характеризующийся ослаблением их прочностных и деформационных характеристик по сравнению с фоновыми значениями, которое вызвано разуплотнением или разупрочнением грунта. Ослабленная зона может не иметь четких контуров.

Исходя из предлагаемого определения, можно сделать вывод о существовании двух генетических разновидностей ослабленных зон: зон разуплотнения и зон разупрочнения. **Зона разуплотнения** – это локальный участок в грунтах покрывающей толщи, характеризующийся их сниженной плотностью или повышенной пористостью, по сравнению с фоновыми значениями. **Зона разупрочнения** – это локальный участок в грунтах покрывающей толщи, характеризующийся сниженными, по сравнению с фоновыми значениями, прочностными и деформационными характеристиками, но без заметного уменьшения плотности или увеличения пористости.

1.2. Требования к исследованию покрывающей толщи для оценки карстовой опасности, содержащиеся в нормативных и методических документах

Из всех видов карста, выделяемых по характеру покровных отложений (рисунок 1.1), в Европейской части Российской Федерации наибольшее распространение имеет покрытый карст (рисунок 1.2). Хотя суммарная площадь районов покрытого карста не очень велика по сравнению с остальной территорией Европейской части России, именно к ним приурочены крупные города и промышленные центры, в том числе с населением, превышающим 1 миллион человек, такие как Москва, Нижний Новгород, Казань, Уфа, Самара. В настоящее время, города Европейской части России, находящиеся в районах покрытого карста, активно развиваются, осваиваются прилегающие к ним территории, ведется строительство новых объектов, а также реконструкция и техническое перевооружение уже существующих. Неудивительно, что именно покрытому карсту уделяется наибольшее внимание в действующих на территории нашей страны нормативных документах, которые в той или иной степени затрагивают проблему хозяйственного освоения карстоопасных территорий. В первую очередь это относится к инженерным изысканиям, проектированию, строительству, эксплуатации и инженерной защите зданий и сооружений.

В районах покрытого карста формирование подземных и особенно поверхностных карстопроявлений негативно влияет на устойчивость покрывающей толщи, которая служит основанием для зданий и сооружений (рисунок 1.3). Следовательно, для обеспечения сохранности и нормальной эксплуатации зданий и сооружений, безопасности жизни и здоровья людей, а также экологической безопасности, необходима прогностическая оценка возможности такого разви-

тия событий. Требования нормативных документов в части инженерно-геологических изысканий в районах развития карста, в конечном счете, сводятся именно к этому.

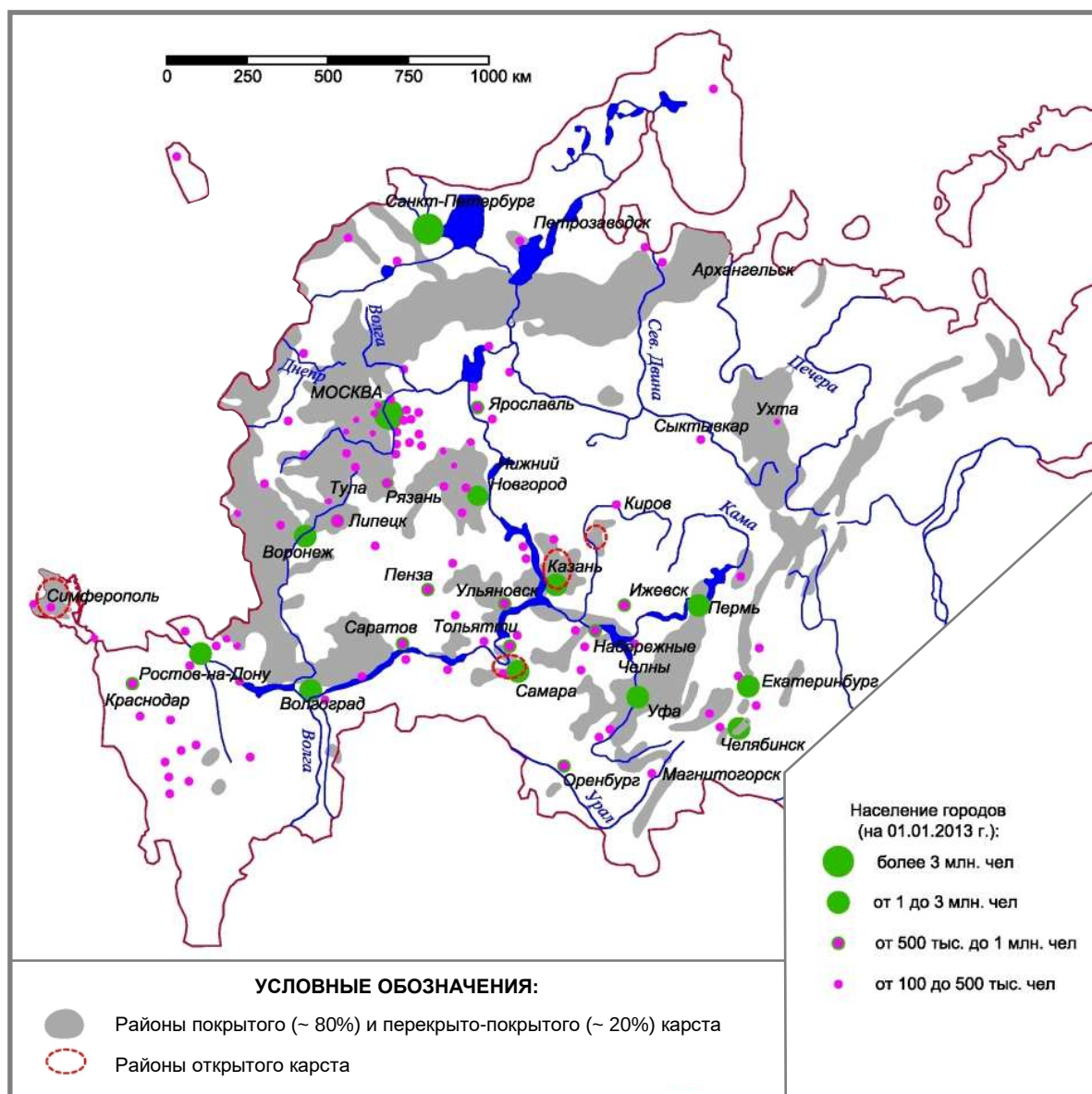


Рисунок 1.2. Схематическая карта распространения карстоопасных территорий в Европейской части России, построенная В.С. Крашенинниковым на основе карты Н.В. Родионова и др. [42] и схематической карты В.Н. и Г.Н. Дублянских [37]

Примечание: города с населением от 100 до 500 тыс. человек показаны без названий

Инженерно-геологические изыскания и проектирование зданий и сооружений в районах развития любых типов карста регламентируются несколькими нормативными и инструктивно-методическими документами. Основными документами такого рода являются общегосударственные строительные нормы [16, 17, 18]. Широко известно также выпущенное в 1995 г. «Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» [69].

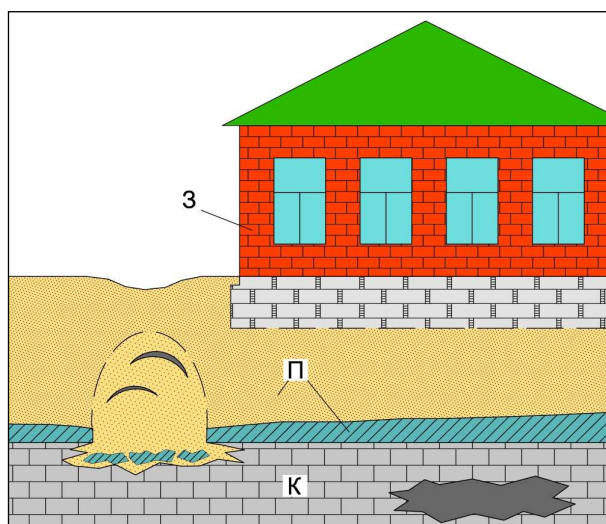


Рисунок 1.3. Взаимосвязь элементов системы «карстующиеся породы (К) – покрывающая толща (П) – здание (З)»

Согласно Градостроительному кодексу РФ [3], субъекты Российской Федерации до последнего времени имели право на разработку собственных территориальных строительных норм. Нормативные документы, регламентирующие инженерные изыскания и проектирование зданий и сооружений на карстоопасных территориях, появились в трех регионах, где карстовые процессы оказывают существенное влияние на хозяйственную деятельность: в Нижегородской области [19], Пермском крае [20, 21] и Республике Башкортостан [22]. Два инструктивно-методических [4, 5] и один нормативный документ [6] аналогичной направленности действуют в Москве. В целом, региональные нормативные документы отражают основные положения и структуру общероссийских строительных норм, но также учитывают местные геологические условия и опыт проведения инженерных изысканий на данной территории.

Все перечисленные выше документы значительное внимание уделяют покрытому карсту и содержат определенные требования к исследованию покрывающей толщи.

Во всех документах говорится о необходимости выполнения динамического или статического зондирования с целью выявления и оконтуривания ослабленных и разуплотненных зон в грунтах покрывающей толщи.

Согласно части II СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» [16], при выполнении инженерно-геологических изысканий в районах покрытого карста «...для всей покрывающей толщи необходимо устанавливать: геологическое строение, литологический состав, состояние, свойства пород, гидрогеологические условия и наличие проявлений карста, к которым относятся разнообразные полости, размытые фильтрующей водой трещины, колодцы (жерла) размыва, оседания и обрушения пород, разрушенные и разуплотненные зоны, нарушения залегания горных пород в результате их сдвижения и обрушения».

В дополнительных требованиях СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» [14] к инженерно-геологическим изысканиям в районах развития

карста говорится о необходимости устанавливать «...рельеф кровли карстующихся пород, состав и условия залегания покрывающих и подстилающих пород, наличие древних погребенных долин». Следует отметить, что в актуализированной редакции данного СНиПа [17], состав требований представлен в более лаконичном виде. В частности, упрощены пункты, касающиеся гидрогеологических условий, проявления карста под землей и инженерно-геологического районирования.

В «Руководстве по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» [69] особо отмечается, что «...кроме водопроницаемости нужно учитывать мощность покрывающих пород и их прочность». В ряде документов [19, 21, 69] при изучении в лабораторных условиях несвязных грунтов, слагающих покрывающую толщу, рекомендуется, помимо стандартных исследований осуществлять определение их суффозионных свойств.

Однако, несмотря на то, что перечень работ, рекомендуемый в упомянутых документах, довольно представительен и достаточен для оценки территории по степени опасности развития карстового процесса, нет ни одного пункта, указывающего на карстологическую специфику перечисленных видов исследований. Не существует ни одного методического пособия по использованию конкретных приемов изучения покрывающей толщи и слагающих ее пород с целью решения прогностических задач. По отношению к сооружению покрывающая толща рассматривается скорее, как зона его воздействия, где нежелательно присутствие каких-то ослабленных элементов, чем как среда развития процессов, способных привести к его разрушению.

1.3. Результаты исследований покрывающей толщи для оценки карстовой опасности, выполненных отечественными и зарубежными специалистами

История изучения карста в нашей стране (имеется в виду не только территория современной России, но и бывшего СССР) насчитывает более полутора веков. В своей основополагающей работе «Основные условия развития карста» Д.С. Соколов [71] выделил два основных периода развития отечественного карстоведения: дореволюционный и советский.

Дореволюционный период Д.С. Соколов характеризует как период обширного накопления фактического материала, описывающего формы и условия распространения карста, и отмечает, что в конце этого периода началось практическое инженерно-геологическое и гидрогеологическое его изучение, результаты которого легли в основу дальнейших исследований в советское время. Особо Д.С. Соколов выделяет работы А.А. Крубера, сделавшего важные шаги в систематизации и обобщении карстовых форм, а также работы В.А. Варсанюфьевой и М.Э. Ноинского, как основателей историко-геологического изучения карста и карстовых явлений.

В советский период изучение карста носило разносторонний характер. Им занимались специалисты разных научных направлений, входящих в комплекс наук о Земле, большей частью взаимосвязанных между собой. Применялись разные методы [60], направленные, в том числе, и на решение хозяйственных задач. Развитие карстоведения в этот период тесно связано с именами Н.А. Гвоздецкого, Г.А. Максимовича, Д.С. Соколова, И.А. Печеркина, В.Н. Дублянского, В.В. Толмачева, И.А. Саваренского и других авторитетных ученых.

Следует отметить, что изучение карста зарубежными исследователями так же насчитывает более ста лет. С конца XIX – начала XX веков широкое распространение получило изучение крупных подземных полостей. Безусловно, здесь нужно выделить французского исследователя Э.А. Мартеля и его фундаментальный труд «Бездны» [96], в котором он заложил основы спелеологии, как науки. В середине XX века, за рубежом, большое внимание уделяется особенностям морфологии карста в различных климатических зонах [94, 95, 101]. Примерно в то же время, преимущественно в Европе, изучались вопросы связи геологической истории с историей развития карста, вопросы циркуляции подземных карстовых вод, водной эрозии и химии процесса. Характерной чертой зарубежных исследований начала-середины прошлого века, как отмечает Д.С. Соколов, является узконаправленное изучение карста, в отличие от исследований отечественных ученых того времени, в которых использовались геофизические, гидрогеологические, геоморфологические, литологические, геохимические и другие методы.

С момента выхода в свет монографии Д.С. Соколова прошло довольно много времени, в течение которого внутри карстоведения резко усилилось направление, именуемое инженерным карстоведением. Согласно В.В. Толмачеву и др. [73], это направление представляет собой раздел науки, объединяющий строительное дело и карстоведение. Оно активно и разносторонне развивается, как в нашей стране, так и за рубежом, и продвинулось далеко вперед в том числе и в изучении покрывающей толщи в карстоопасных районах. Автор предлагает краткий обзор результатов исследований такого рода, выполненных, начиная с конца XX века.

Об изменениях, происходящих в покрывающей толще над контактирующими с ней полостями, сформировавшимися в растворимых породах, известно давно. Результаты исследования таких феноменов отражены в ряде работ. Одним из первых, на это указал Д.С. Соколов [71], рассуждая о карстово-суффозионных каналах и полостях как о связующем звене «между подземными карстовыми полостями и ... поверхностными формами в нерастворимых породах». По этим каналам и полостям происходит суффозионный вынос материала из покрывающих рыхлых отложений в крупные карстовые полости в толще растворимых пород. Он отмечает, также, что изучить процесс формирования карстово-суффозионных каналов и полостей практически невозможно, так как они (впрочем, как и все остальные подземные карстовые формы) «недоступны для непосредственного наблюдения», и это затрудняет инженерно-геологическую оцен-

ку территорий в условиях покрытого карста. В связи с этим, Д.С. Соколов видит необходимость в исследовании состава и свойств покрывающих пород, а также режима подземных вод.

На необходимость изучения состава покрывающих пород указывает и Н.М. Кухарев [56]. По его мнению, это позволит определить «динамику процесса карстообразования». Справедливость этого тезиса подтверждают исследования, выполненные В.П. Хоменко в г. Москве [75]. Им были отобраны пробы покрывающих водонасыщенных песков из скважин, пробуренных на разном удалении от карстово-суффозионных провалов, определены их гранулометрический состав и суффозионные свойства. Был сделан вывод о закономерном пространственном распределении этих показателей, отражающем динамику развития суффозии, как компонента процесса формирования провалов.

В.М. Кутепов и В.Н. Кожевникова [55] развивая идею Д.С. Соколова о процессах, происходящих выше карстующихся пород, отмечают, что при продолжительном суффозионном выносе частиц грунта из покрывающей толщи в карстовые полости, происходят изменения физических свойств слагающих ее пород. В первую очередь происходит «разуплотнение» грунта, образуются ослабленные зоны. Причем, как отмечают авторы, если покрывающая толща неоднородна, а в разрезе присутствует слой глинистого грунта, перекрывающий пески, в них могут образовываться даже небольшие полости, обнаруживаемые по провалу бурового инструмента. Появление таких аномалий, приводит к изменению напряженного состояния массива горных пород, которое является отражением истории геологического развития территории. По мнению авторов, изучение закономерностей распределения естественных напряжений и структурных изменений в толще грунтов, в том числе покрывающих, позволяет дать оценку устойчивости территории и прогноз провалообразования.

В качестве негативных факторов, способствующих карстово-суффозионному провалообразованию, В.М. Кутеповым и В.Н. Кожевниковой рассматриваются такие структурные элементы массива горных пород как погребенные эрозионные долины и погребенные провалы. Кроме этого перечисляются гидрогеологические факторы, при наличии хотя бы одного из которых, карстово-суффозионные процессы могут активизироваться. К таким факторам относятся: «региональное или локальное понижение уровня карстовых вод; обводнение рыхлых покровных отложений; резкие суточные или сезонные колебания уровней подземных вод; изменение гидрогеологической обстановки, связанное с добычей полезных ископаемых, строительство гидротехнических сооружений и др.».

Предлагая разработанный ими метод оценки карстово-суффозионной опасности, основанный на анализе гидрогеологических условий, В.М. Кутепов и В.Н. Кожевникова указывают на целесообразность дальнейших исследований, направленных на изучение «состояния и свойств массивов пород над закарстованными толщами». В частности, по мнению авторов глинистые

грунты, покрывающие и разделяющие карстующиеся породы, могут служить «индикатором» геологических процессов, происходивших на разных этапах развития территории. Ими высказана мысль о том, что «...особенности условий залегания и аномальные значения показателей инженерно-геологических свойств глинистых отложений можно использовать в качестве поисковых признаков при прогнозе провалов на закарстованных территориях».

В развитие идей В.М. Кутепова и В.Н. Кожевниковой сотрудники ОАО «ПНИИС», анализируя результаты инженерных изысканий, выполненных на отдельных площадках в центре Москвы, пришли к выводу, что выделять участки погребенных провалов по данным бурения удобно путем совмещения карт поверхностей маркирующих горизонтов [38, 92]. Для этого целесообразно применять современные способы визуализации графической информации.

Представления В.М. Кутепова и В.Н. Кожевниковой о значительном влиянии изменения гидродинамического режима не только карстовых, но и надкарстовых вод на активизацию карстово-провальных процессов разделяют большинство ученых-карстоведов. Особого внимания заслуживает исследование А.В. Аникеева и М.В. Леоненко [28]. Ими был выполнен анализ материалов карстологических и режимных гидрогеологических наблюдений, проводимых с 30-х годов прошлого века в г. Дзержинске Нижегородской области. Авторы указали на прямую связь между изменениями уровней безнапорных надкарстовых (грунтовых) и напорных карстовых вод с частотой карстового провалообразования. Следует отметить, что А.В. Аникеев в ряде своих работ [24, 25, 26] представил серьезное экспериментальное и теоретическое обоснование необходимости изучения покрывающей толщи для прогноза формирования карстовых провалов, что будет подробно рассмотрено в последующих разделах диссертации.

На необходимость изучения состояния и свойств грунтов покрывающей толщи, анализа изменения напряженного состояния массива и изменения гидрогеологических условий указывают и зарубежные специалисты. При этом они обращают внимание на некоторые дополнительные аспекты рассматриваемой проблемы.

О формировании ослабленных зон над карстовыми полостями упоминают в своем обзоре американские исследователи У. Джоу и Б. Бек [105]. Они считают, что обрушению или оседанию грунтов покрывающей толщи, скорее всего, предшествует формирование полости на контакте дисперсных и скальных пород за счет транспортировки частиц грунта в полости, присутствующие в коренных (карстующихся) породах. Они также отмечают, что поисковые скважины часто вскрывают рыхлые грунты чуть выше кровли коренных пород и делают вывод, что ослабленные участки могут свидетельствовать о продолжающемся процессе обрушения покрывающей толщи. Кроме того, У. Джоу и Б. Бек указывают на то, что активность водных потоков является наиболее важным фактором в формировании провалов, оседаний, растворении пород и обрушении кровли полостей, и что вода является «активатором механизма провалообразова-

ния». Авторы описывают механизм расширения трещин и каверн до крупных полостей под воздействием водного потока, рассматривая так же, как и Д.С. Соколов [71] небольшие трещины как транспортировочные каналы для переноса частиц грунта в более крупные полости.

В переведенной на русский язык и прокомментированной В.В. Томачевым монографии Г. Адерхолд [23], посвященной исследованиям в карстоопасных районах земли Гессен (ФРГ), сказано: «...имеет значение изменение напряженного состояния в основании (Untergrund – под этим термином автор понимает слои грунта, включая сжимаемую толщу основания, где могут развиваться карстовые деформации, влияющие на сооружение) для последующей строительнотехнической оценки, а также для оценки возможности обрушения пород с глубины до земной поверхности». Земля Гессен имеет самые разнообразные условия для развития карста, и здесь представлены практически все его разновидности, выделяемые как по литологическому составу, так и по условиям залегания горных пород и грунтовых вод. Г. Адерхолд отмечает, что разные по составу перекрывающие породы по-разному взаимодействуют с карстовыми полостями: вязкие глинистые грунты оказывают большее влияние на окружающие полость породы за счет испытываемых пластических деформаций, чем хрупкие скальные. В свою очередь хрупкие породы, такие как песчаник или известняк, способны накапливать энергию, не вызывая существенных изменений в напряженном состоянии массива, но затем могут внезапно обрушиться. Автор также указывает на то обстоятельство, что «рядом с древними провалами и мульдами оседаний образуются и современные карстопроявления».

Совместная публикация испанского исследователя Ф. Гутьерреса и британских исследователей Э. Купера и К. Джонсона [89] посвящена различным методам идентификации и прогноза карстовых процессов, включающих в себя полевые геолого-геофизические методы, изучение геоморфологических особенностей территории, поиск древних провалов и др. В ней говорится о том, что при отсутствии на поверхности видимых проявлений подземных (карстовых) процессов, необходимо получить как можно больше геологической информации о состоянии грунтов на глубине и вблизи земной поверхности. Это, как справедливо отмечают авторы, даст возможность получить данные о текущих и прошедших процессах провалообразования. Они указывают также, что надежность прогноза формирования провалов в будущем зависит в основном от полноты геологической информации и от понимания местных геологических и гидрогеологических условий.

Как уже было сказано выше, над карстовыми полостями, в покрывающей толще формируются ослабленные зоны. Одним из способов регистрации таких аномалий является динамическое или статическое зондирование. В обычных условиях сопротивление грунта при погружении в него конуса зонда увеличивается с глубиной. Связано это с закономерностями осадконакопления: нижележащий грунт уплотняется под тяжестью вышележащих слоев. Если же этого

не происходит или наблюдается обратная тенденция, то можно предположить, что точка зондирования находится на «аномальном» или «ослабленном» участке. Разумеется, при этом необходимо учитывать особенности геолого-литологического строения территории, так как не каждое снижение сопротивления зонда с глубиной бывает связано с карстовыми или суффозионными процессами и такую связь следует доказать.

Одним из первых, исследования в этом направлении начал проводить В.П. Хоменко, используя математический аппарат тренд анализа [76]. Впоследствии им была разработана прогностическая методика, позволяющая определять наиболее вероятное местоположение провала любого генезиса в случае его образования [91]. Эта методика позволяет отслеживать разупрочнение грунтов над полостями, и вполне применима для прогноза карстового провалообразования, для чего она в основном и используется. В последнее время некоторые специалисты осуществляют обработку данных статического и динамического зондирования для тех же целей, но исходя из иных теоретических предпосылок, например, так, как это делают О.В. Зеркаль и др. [39]. Любопытно отметить, что стоящая в этом же ряду методика М.В. Леоненко позволяет получать прогностические результаты очень близкие к результатам, получаемым с применением методики В.П. Хоменко [106].

Использование статического и динамического зондирования для прогнозирования местоположения карстовых провалов практикуется и за рубежом. В статье Э. Зисмэна [103], посвященной определению местоположения провала в карстоопасном районе штата Флорида (США), сказано: «прочность осадочных пород имеет тенденцию к увеличению с глубиной благодаря консолидации от давления вышележащих слоев». Далее автор указывает, что необходимо обращать внимание на те графики статического зондирования (SPT), у которых высокие значения в верхних слоях грунта с глубиной становятся низкими, и остаются таковыми вплоть до кровли известняков. В другой своей работе [104] автор описывает метод количественной оценки риска провалообразования в условиях штата Флорида. Риск оценивается по 14-ти характерным признакам, среди которых – показатели статического зондирования (наличие рыхлых или слабых грунтов, провал зонда), наблюдения за скважиной при бурении (расход бурового раствора, провалы инструмента, обрушение стенок скважины), скачкообразные колебания уровней грунтовых и подземных вод, данные геофизических исследований (наличие аномалий), характерное залегание кровли погребенных слоев (наличие древних воронок), отсутствие водоупора, наличие просадок или других признаков (пруды, озера) на поверхности, структурные нарушения. Автор дает рекомендации выполнять зондирование и бурение скважин в местах аномалий, выявленных геофизическими методами, и в районе структурных нарушений.

Исследователь из Великобритании К. Эдмондс [87] оценивает потенциальную опасность провальных процессов в районах распространения открытого и покрытого мелового карста в

Южной и Западной Англии. Среди прочего, он указывает на возможность применения динамического зондирования (Dynamic Probing) для обнаружения возможных просадок и погребенных воронок в покрывающей толще, вызванных естественными карстовыми процессами и проходкой горных выработок в мелах. Автор утверждает: «зондирование особенно чувствительно к изменениям прочности грунта и его плотности». Он предлагает на опасном участке расположить сеть точек зондирования, а затем сравнить их графики, и таким образом определить центр предполагаемой аномалии.

Британским геофизиком Дж. Такуелом и его коллегами [98] была установлена возможность использования динамического зондирования для обнаружения разуплотненных зон в покрывающей толще, непосредственно связанных с закарстованностью растворимых пород. Исследования проводились в северной части Лондона. На площадке при помощи микрогравиразведки были выделены аномалии с низкой плотностью грунтов, предположительно образовавшиеся из-за наличия полостей в нижележащих закарстованных меловых породах, а также в местах древних воронок. Затем внутри аномалий были проведены испытания грунтов динамическим зондированием. Анализ результатов показал хорошую сходимость геофизических данных и данных динамического зондирования.

Американские геологи К. Чэнг и К. Баснет [85] описывают успешный опыт выявления и оконтуривания погребенных карстовых форм и ослабленных зон в городе Орландо, штат Флорида, США. Этот район известен многочисленными подземными и поверхностными карстопроявлениями. Исследования проводились с помощью: а) георадара (ground penetrating radar – GPR); б) динамического зондирования (standard penetration test borings – SPT) с использованием полого зонда вместо конуса, что позволяет попутно отбирать пробы грунта; в) статического зондирования (Dutch cone penetration test – CPT). Авторами отмечается также, что применение этих методов в условиях покрытого карста, помимо получения качественной геологической информации, целесообразно ещё и в экономическом аспекте.

Бельгийские исследователи О. Кауфманн и И. Киниф [90] провели изыскания в районе Турнези (Tournaisis), в южной части Бельгии, целью которых было определение положения кровли растворимых пород и обнаружение погребенных карстовых форм в условиях покрытого карста. Совместное применение вертикального электрического зондирования – ВЭЗ (2D electrical resistivity tomography – 2D-ERT), статического зондирования (CPT) и бурения скважин принесло положительные результаты. По полученным данным, авторами была построена трехмерная модель исследованного массива горных пород и были определены потенциально опасные, с точки зрения провалообразования, зоны.

Анализ опубликованной за последние десятилетия научно-технической литературы позволил выявить несколько тенденций в изучении покрывающей толщи для оценки устойчивости

территории и прогнозирования карстового провалообразования. При решении соответствующих задач отечественными и зарубежными исследователями были получены важные с практической точки зрения результаты, которые вкратце сводятся к следующему:

1. Изучение гидрогеологических условий карстоопасных территорий показало, что колебания уровней надкарстовых и карстовых вод приводят к активизации процессов провалообразования. Изменение гидрогеологического режима происходит, как правило, на большой площади, поэтому в рассматриваемом аспекте гидрогеологические факторы имеют скорее региональную, чем локальную значимость.

2. При наличии в покрывающей толще нисходящего фильтрационного потока на контакте несвязных дисперсных пород с закарстованными породами происходит суффозионный перенос мелких частиц в полости. При этом, вблизи полости возникает характерная картина зонального распределения пылевато-глинистых частиц: чем ближе к полости, тем их процентное содержание в пробе меньше, а непосредственно у полости, они практически отсутствуют.

3. Над карстовыми полостями возникают так называемые ослабленные участки, которые характеризуются снижением плотности или прочности грунта. Зоны разуплотнения грунта вызваны суффозионным выносом тонкодисперсных частиц в каналы и трещины карстующихся пород. Снижение прочности водоупорных слоев, перекрывающих закарстованные породы, связано с пластическими деформациями (прогиб, выпор и т.д.) глинистых грунтов над крупными полостями, которые отражаются и на толще вышележащих грунтов. Такие аномальные зоны приводят к перераспределению (изменению) полей напряжений грунтового массива. Ослабленные зоны хорошо идентифицируются с помощью статического и динамического зондирования.

4. Важным фактором при оценке устойчивости территории является наличие древних погребенных поверхностных карстопроявлений. Они прослеживаются по характерным понижениям на дневной поверхности или в кровле погребенных глинистых слоев, которые могут служить индикатором происходивших здесь провальных процессов.

1.4. Выводы

1. Районы покрытого карста, где над растворимыми породами залегает толща дисперсных пород мощностью более 2 м, именуемая «покрывающей», имеют широкое распространение в Европейской части России. В их пределах расположены десятки городов с населением более 100 тысяч человек, а также ряд крупных промышленных и энергетических центров.

2. Действующие в настоящее время и использовавшиеся ранее нормативные, инструктивные и методические документы, регламентирующие инженерно-геологические изыскания в карстовых районах, содержат определенные требования к изучению строения покрывающей

толщи, свойств слагающих ее пород и присутствующих в них подземных вод. Однако эти требования носят общий характер и не ориентируют изыскателей на возможность использования результатов этих исследований для решения конкретных прогностических задач, связанных с оценкой карстовой опасности.

3. Согласно мнению многих отечественных и зарубежных 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.

2. Особенности покрывающей толщи, указывающие на потенциальную возможность карстового провалообразования

2.1. Необходимые условия, причины и признаки подготовки карстового провалообразования

Согласно традиционным представлениям [69], в условиях покрытого карста могут формироваться карстовые провалы трёх генетических типов: карстово-обвальные, карстово-суффозионные и смешанные (карстово-суффозионно-обвальные). В последние годы эти представления расширились, и теперь дополнительно предлагается различать два генетических типа карстово-обвальных и два генетических типа карстово-суффозионных провалов [54, 80]. В число причин появления всех этих карстовых провалов, краткая характеристика которых дается ниже, входят динамические воздействия на грунты и их открытая экскавация, что характерно для строительных работ.

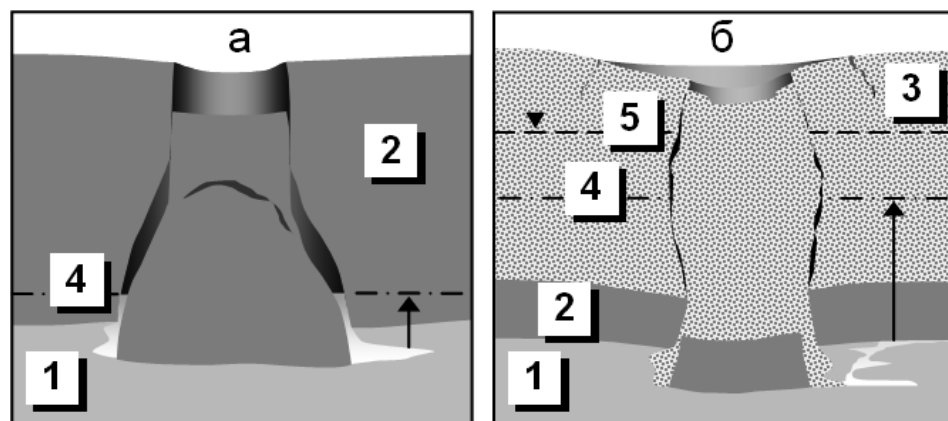


Рисунок 2.1. Карстово-обвальные провалы «простого» и «сложного» типов
1 – карстующиеся породы; 2 – водонепроницаемые глинистые породы; 3 – песчаные породы; 4 – уровень карстовых вод; 5 – уровень надкарстовых вод

Карстово-обвальные провалы (рисунок 2.1) образуются там, где карстующиеся породы перекрыты водоупором, сложенным глинистыми грунтами. Для **карстово-обвальных провалов «простого» типа** [78] необходимо, чтобы кровля водоупора выходила на земную поверхность (рисунок 2.1а), а для **карстово-обвальных провалов «сложного» типа** [79] – чтобы карстующиеся породы и водоупор были перекрыты водонасыщенными песками (рисунок 2.1б). И в том и в другом случае карстовые воды могут быть напорными, а их пьезометрический уровень может находиться на любой высоте. Карстово-обвальное провалообразование обоих типов инициируется расширением полости в растворимых породах и снижением напора карстовых вод, но провалы «сложного» типа возникают еще и в результате поступления воды в покрывающую толщу.

Карстово-суффозионно-обвальные провалы (рисунок 2.2), или провалы «смешанного» типа образуются в условиях, когда покрывающая толща содержит несвязные породы. Эти провалы представляют собой результат закрытого фильтрационного разрушения несвязных пород восходящим потоком, однако при этом суффозионный вынос имеет нисходящий характер и осуществляется в незакольматированные трещины или полости любого происхождения, в данном случае присутствующие в карстующихся породах [77]. Чаще всего карстово-суффозионно-обвальные провалы образуются при прямом контакте водонасыщенных несвязных пород с карстующимися породами, как показано на рисунке 2.2. Если же карстующиеся породы перекрыты водоупором, то для формирования таких провалов необходимо наличие или появление субвертикальных сквозных каналов, нарушающих его целостность, а карстовые воды должны иметь напорный характер, причем пьезометрическая поверхность карстовых вод должна располагаться выше кровли водоупора. Выше пьезометрической поверхности карстовых вод могут залегать как связные, так и несвязные необводненные породы. В рассматриваемых условиях причиной провалообразования часто служит расширение полости в карстующихся породах или приток в них воды, однако при отсутствии водоупора и воды в несвязных породах, карстово-суффозионно-обвальные провалы могут формироваться только при ее поступлении снизу, из карстующихся пород.

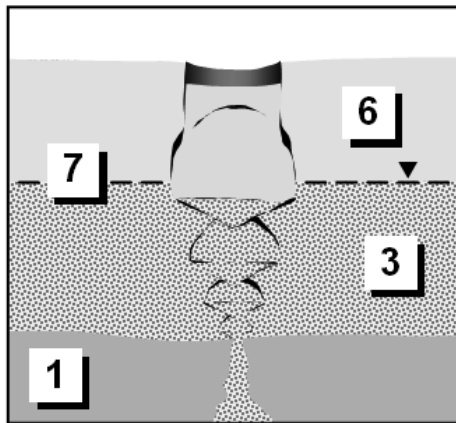


Рисунок 2.2. Карстово-суффозионно-обвальный провал, сформировавшийся в условиях прямого контакта водонасыщенных несвязных пород с карстующимися породами

6 – связные или необводненные несвязные породы;
7 – уровень воды в едином водоносном горизонте карстовых и надкарстовых вод. Остальные условные обозначения см. на рисунке 2.1

Карстово-суффозионные провалы (рисунок 2.3) образуются при наличии в покрывающей толще несвязных пород и появлении в них нисходящего фильтрационного потока, который разгружается в незакольматированные трещины или полости, присутствующие в карстующихся породах [77]. Если покрывающая толща обводнена, такой тип провалов называется **фреатическим** (рисунок 2.3а). При этом карстующиеся породы могут быть перекрыты водоупорным слоем, в котором имеется сквозной канал, соединяющий карстовую полость с несвязными водонасыщенными породами, как показано на рисунке 2.3а, либо водоупор может отсутствовать. Для

формирования карстово-суффозионного провала фреатического типа необходимо, чтобы уровень карстовых вод занял более низкое положение относительно уровня надкарстовых вод в результате оттока воды из растворимых пород и (или) ее поступления в покрывающую толщу. Если же несвязные грунты покрывающей толщи не обводнены, то при поступлении в них воды может возникнуть карстово-суффозионный провал **вадозного** типа (рисунок 2.3б).

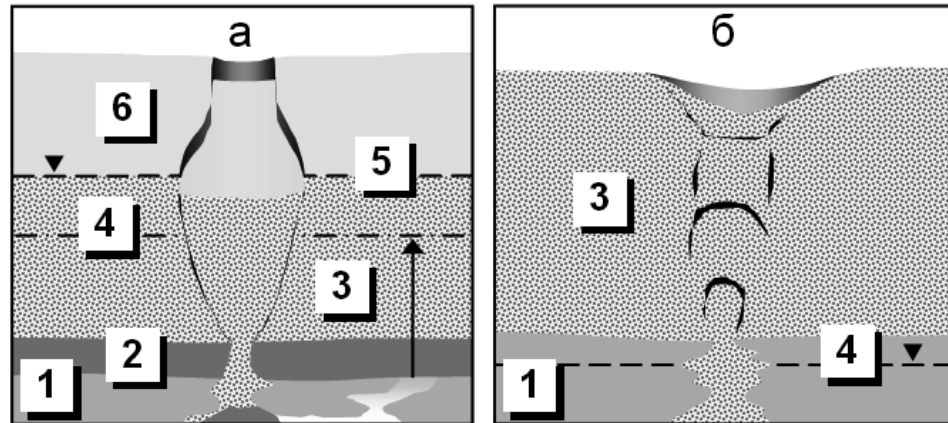


Рисунок 2.3. Карстово-суффозионные провалы фреатического (а) и вадозного (б) типов. Условные обозначения см. на рисунках 2.1 и 2.2

Существуют определенные признаки, которые могут указывать на возможность образования карстового провала в условиях покрытого карста. Они связаны с процессами, происходящими в покрывающей толще при формировании карстовых провалов (рисунок 2.4). Некоторые из этих признаков могли возникнуть очень давно, зато появление других однозначно сигнализирует о приближении провалообразования. Их можно разделить на две группы: первая обусловлена воздействием воды на горные породы, вторая – действием на них гравитационных сил (таблица 2.1). Некоторые из признаков можно обнаружить лишь при определенных условиях.

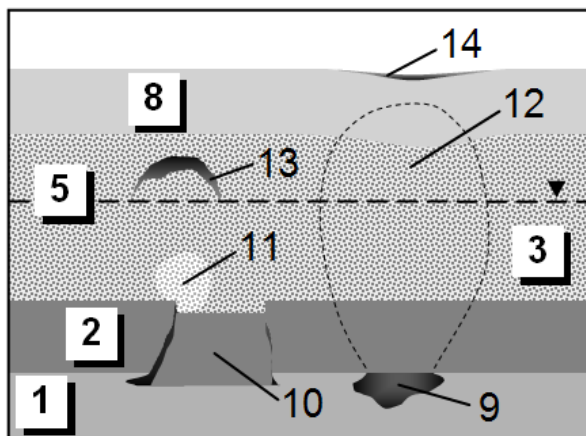


Рис. 2.4. Признаки подготовки провалообразования, обусловленного развитием покрытого карста

8 – связанные породы; 9 – незакольтированная полость в карстующихся породах; 10 – погребенный провал; 11 – зона суффозионного разуплотнения несвязных пород; 12 – зона разупрочнения пород покрывающей толщи над полостью; 13 – полость в породах покрывающей толщи; 14 – оседание земной поверхности. Остальные условные обозначения см. на рисунке 2.1

Таблица 2.1. Принципиальная возможность (+) или невозможность (–) обнаружения признаков подготовки карстового провалообразования

Признаки подготовки провалообразования в условиях покрытого карста		Генетические типы готовящегося карстового провалообразования				
		карстово-обвальное		карстово-суффозионно-обвальное	карстово-суффозионное	
		«простого» типа	«сложного» типа		фреатического типа	вадозного типа
1-я группа	Незакольматированные полости в карстующихся породах	+	+	+	+	+
	Погребенные поверхностные проявления покрытого карста	+	+	+	+	+
	Зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород	–	–	–	+	+
2-я группа	Зоны разупрочнения пород покрывающей толщи над полостями	+	+	+	+	+
	Полости в породах покрывающей толщи	+	–	+	+	+
	Оседания земной поверхности	+	+	+	+	–

Самым ранним признаком, относящимся к первой группе, является наличие в карстующихся породах незакольматированной полости, образовавшейся в результате их растворения. Этот признак свидетельствует о начале подготовки карстового провалообразования любого генетического типа и не только в районах покрытого карста. Не меньшую тревогу должно вызывать и обнаружение погребенных поверхностных проявлений покрытого карста (оседаний и провалов), что связано с несколькими причинами, о чем подробно будет сказано в следующем подразделе. Третий признак, входящий в первую группу, представляет собой наличие в несвязных породах покрывающей толщи разуплотненных зон, возникающих в результате начавшегося суффозионного выноса мелких частиц из пор.

Признаки, входящие во вторую группу, проявляются позднее. Первый из них связан с изменением напряженного состояния покрывающей толщи над полостью, присутствующей в растворимых породах, в результате чего формируется зона разупрочнения дисперсных пород. Более поздний признак – наличие полости в покрывающей толще, которая появится, если начавшееся обрушение дисперсных пород в своей первой стадии ограничится их внутренним вывалом. Если же в покрывающей толще присутствуют связные породы, их прогиб над поло-

стью или ослабленными породами может привести к растущему оседанию земной поверхности. Нередко этот феномен непосредственно предшествует образованию провала.

Последний из перечисленных признаков может быть уверенно идентифицирован только в результате достаточно длительных стационарных наблюдений за изменением абсолютных отметок земной поверхности, осуществляемых в ходе инженерно-геодезических изысканий. Остальные признаки подготовки карстового провалообразования могут быть выявлены при инженерно-геологических изысканиях с использованием различных методов и технических средств (таблица 2.2). Согласно действующим нормам, чуть ли не единственным тревожным сигналом в этом отношении считается обнаружение карстовых полостей в процессе бурения. При этом упускается из виду одно парадоксальное обстоятельство: до сих пор (по крайней мере, на территории России) ни одна из вскрытых скважинами карстовых полостей не проявила себя на земной поверхности в виде провала.

Таблица 2.2. Технические возможности обнаружения признаков подготовки карстового провалообразования в ходе инженерных изысканий

Признаки подготовки карстового провалообразования	Методы исследований	Вероятность обнаружения признака
Незакольматированные полости в растворимых породах	Проходка скважин	Низкая
Погребенные поверхностные проявления покрытого карста	Проходка скважин, статическое или динамическое зондирование	Низкая
Зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород	Определение гранулометрического состава грунтов	Очень низкая
Зоны разупрочнения пород покрывающей толщи над полостями	Статическое или динамическое зондирование	Высокая
Полости в породах покрывающей толщи	Проходка скважин, статическое или динамическое зондирование	Низкая
Оседания земной поверхности	Стационарные геодезические наблюдения	Высокая

Предлагается рассмотреть некоторые особенности покрывающей толщи [46, 48, 50], которые могут указывать на возможность будущего провалообразования, но которым до сих пор уделяется недостаточное внимание. К таким особенностям или признакам потенциальной опасности относятся:

а) наличие погребенных провалов, оседаний и других подземных деформаций, вызванных карстовыми процессами;

б) изменение содержания тонкодисперсных частиц в несвязных грунтах вблизи карстовых каналов и полостей;

в) снижение прочности грунта над карстовыми полостями.

Для выявления указанных выше особенностей, диссертант опирается на методы и технические средства, регламентируемые нормативными документами [16, 17], требования которых в отношении изучения покрывающей толщи в районах покрытого карста подробно рассмотрены в подразделе 1.2.

Следует сразу оговориться, что геофизические методы, которые являются менее трудозатратными чем, скажем, бурение, зондирование, лабораторные исследования, и, на первый взгляд, довольно эффективными, имеют несколько объективных ограничений для их практического применения в изучении покрывающей толщи [53, 82]. В первую очередь это касается самой природы геофизических методов, будь то электроразведка, сейсморазведка, гравиметрия или различные виды каротажа. Все они основаны на принципах регистрации прохождения и отражения волны в какой-либо среде, т.е. результаты, полученные этими способами, являются косвенными, а не прямыми. Во-вторых, в силу того, что данные геофизических исследований носят интегральный характер, довольно сложно определить генезис обнаруженной аномалии. В-третьих, при окончательной обработке данных исследований, большую роль играет так называемый «человеческий фактор», то есть качество обработки материала зависит от опыта и практических навыков самого интерпретатора, от того, как он видит «картинку». В связи с этим, в данном разделе, основное внимание уделяется «прямым» методам получения геологической информации – бурению, статическому и динамическому зондированию, лабораторным исследованиям свойств грунтов. Однако, нет никаких противопоказаний для совместного, параллельного использования прямых методов получения информации с геофизическими методами.

2.2. Погребенные карстовые оседания и провалы

2.2.1. Описание феномена и способы его выявления

Одним из наиболее важных признаков карстоопасности какой-либо территории является присутствие на ней поверхностных карстовых проявлений и прежде всего провалов и оседаний. При этом в принципе не имеет значения, открытые это формы или погребенные. К последним можно отнести как древние провалы и оседания, перекрытые толщей грунтов в процессе естественного осадконакопления, так и современные, засыпанные умышленно с целью планировки территории. Как правило, относительно небольшие замкнутые отрицательные формы рельефа, к которым можно отнести карстовые провалы и оседания, вызывают подсознательное желание их засыпать или сровнять с поверхностью, особенно, в случае, когда они мешают хозяйствен-

ному освоению территории, после чего о них забывают. Тем не менее, достаточно свежие засыпанные карстовые провалы и оседания в ряде случаев все-таки можно обнаружить по нескольким признакам:

- по различию грунтов на земной поверхности на месте засыпанного провала или оседания и рядом с ним;
- по различию растительного покрова на свежесыпанном провале или оседании и рядом с ними;
- по наличию небольших заболоченных участков;
- по данным опроса местного населения и работников местных предприятий;
- по информации, присутствующей на старых топографических картах и планах.

Совсем иначе дело обстоит с древними карстовыми провалами и оседаниями, погребенными под толщей осадочных пород. В силу того, что эти формы палеорельефа расположены на глубине, обнаружить их можно лишь проводя инженерно-геологические изыскания, в состав которых входят буровые работы или, по крайней мере, статическое или динамическое зондирование, возможно в сочетании с геофизическими исследованиями. Проблема обнаружения погребенных форм заключается в том, что древние карстовые провалы и оседания в процессе геологической эволюции земной поверхности, а именно, благодаря процессам осадконакопления, были перекрыты более молодыми осадочными породами. Так как следы древних деформаций часто не отражены на поверхности, для их обнаружения требуется применение палеогеоморфологического анализа, в основу которого положены данные бурения или зондирования. Статическое или динамическое зондирование можно использовать в случае неглубокого и доступного для зондов залегания карстующихся пород или маркирующих горизонтов покрывающей толщи. В остальных случаях, необходимую информацию можно получить только с помощью бурения. Для палеогеоморфологического анализа необходимо построить геолого-литологические разрезы или карты поверхностей определенных слоев.

Главным условием для выявления погребенных подземных карстовых форм является наличие не менее двух субгоризонтальных маркирующих поверхностей, одна из которых является подошвой покрывающей толщи [53]. В этом случае подразумевается, что вблизи кровли карстующихся пород находится обрушившаяся полость, а подошва вышележащего покровного слоя наследует эту деформацию, которая проявляется в виде характерного понижения.

На рисунке 2.5 представлен геолого-литологический разрез одного из карстоопасных участков г. Москвы – района Хорошевского шоссе [55]. Отчетливо видна довольно глубокая (более 25 м глубиной) карстовая воронка, вскрытая буровыми скважинами. Кровля карстующихся пород имеет характерное понижение, заполненное обрушившимися породами покрывающей толщи. В данном случае маркирующим слоем являются верхнекаменноугольные воскре-

сенские глины. Можно предположить, что обрушение произошло в верхнекаменноугольное время. На это указывает тот факт, что в вышележащих верхнеюрских глинистых и четвертичных песчано-глинистых отложениях деформация не прослеживается.

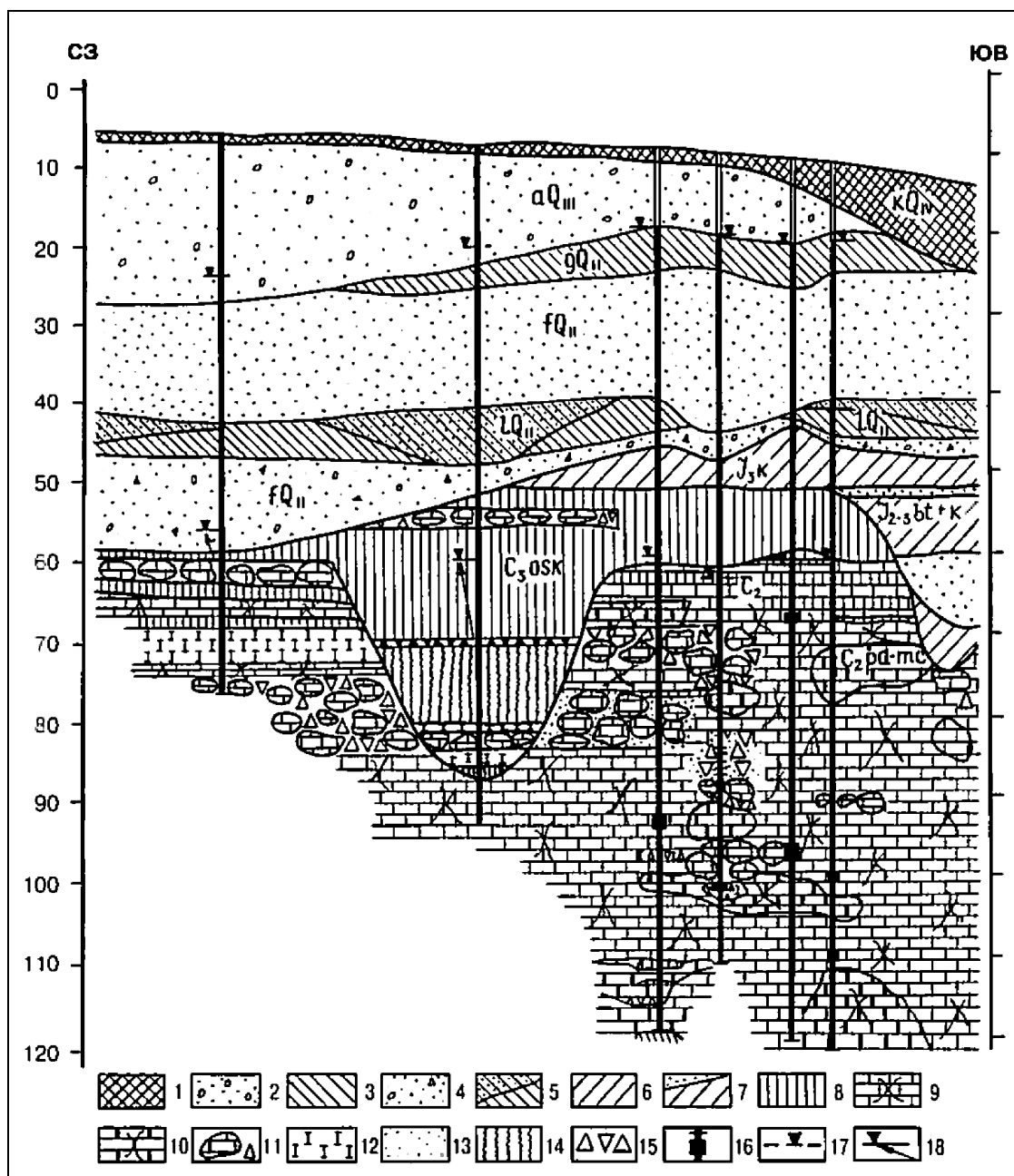


Рисунок 2.5. Древняя погребенная карстовая воронка на поверхности среднекаменноугольных пород (по В.М. Кутепову и В.Н. Кожевниковой [55])

1 – насыпной слой; 2-5 – четвертичные отложения: 2 – аллювиальные, 3 – ледниковые, 4 – флювиогляциальные, 5 – озерные; 6-7 – юрские отложения: 6 – глины келловей, 7 – баткелловейские песчано-глинистые; 8-12 – каменноугольные отложения: 8 – мергелистые глины воскресенской толщи верхнего карбона, 9 – известняки трещиноватые, 10 – доломиты, 11 – известняки разрушенные, 12 – известковистая мука; 13 – песок; 14 – переотложенные глины; 15 – обломки известняков; 16 – провал бурового снаряда; 17 – уровень грунтовых вод; 18 – напор карстовых вод

Следует, однако, отметить, что далеко не всегда погребенные древние карстовые провалы и оседания имеют такую глубину. На рисунке 2.6 показаны две схематические карты маркирующих поверхностей, построенные с помощью компьютерной программы «Surfer 10» (разработка компании «Golden Software, Inc.»), с применением алгоритма «Inverse Distance to a Power». В основе их построения лежат материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных в 2011 г. на территории Павшинской поймы в г. Красногорске Московской области [47]. Верхняя часть геологического разреза представлена здесь следующими отложениями (снизу-вверх):

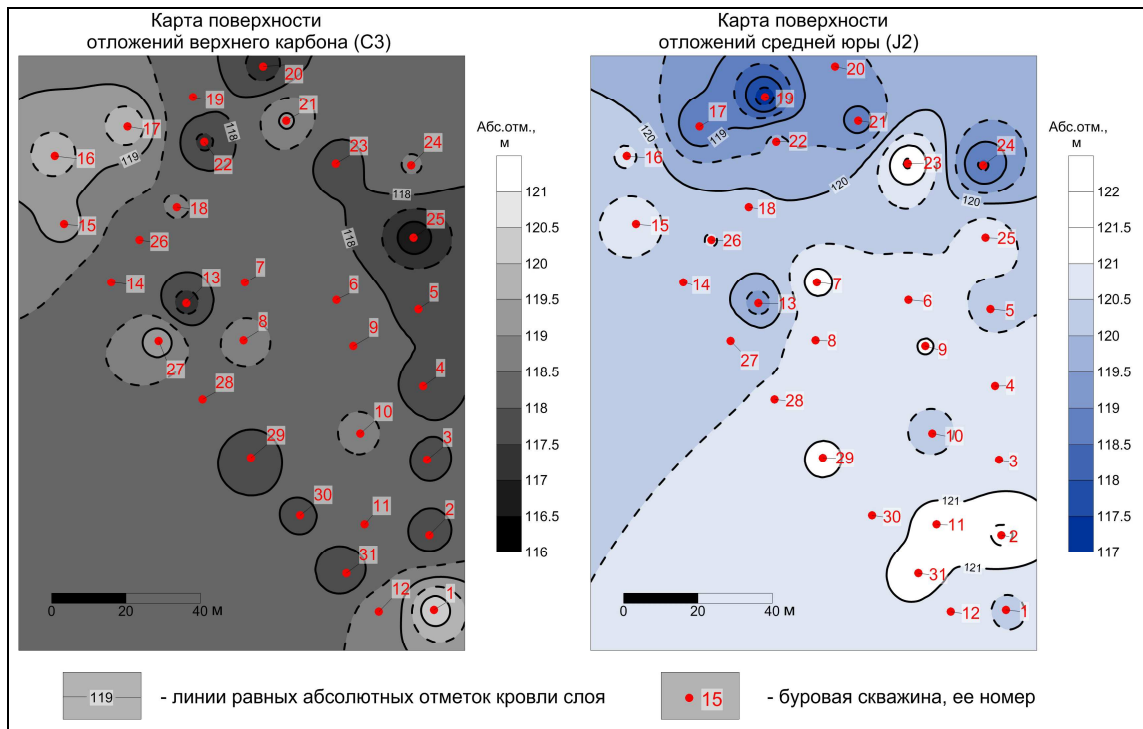


Рисунок 2.6. Карты маркирующих поверхностей на одном из карстоопасных участков Павшинской поймы (г. Красногорск Московской области): слева кровля карстующихся известняков; справа кровля перерывающих их глин

– водоносными известняками и доломитами дорогомиловской свиты (C_{3dr}) верхнего отдела каменноугольной системы, различной степени трещиноватости, с подчиненными прослоями мергелей, залегающими на глубинах 10,0-12,0 м от земной поверхности;

– глинами пронского яруса (J_{2pr}) среднего отдела юрской системы, мощностью 2,0-5,0 м, местами размытыми;

– современными четвертичными (aQ_4) отложениями: водонасыщенными песками различной крупности, с маломощными (1-2 м) прослоями суглинков, общей мощностью 8,0-10,0 м.

В роли одной из маркирующих поверхностей выступает кровля карстующихся пород (она же является подошвой покрывающей толщи), в данном случае это отложения дорогомиловского горизонта верхнего карбона (C_{3dr}). Другая маркирующая поверхность соответствует кровле

водоупорных глин пронской свиты среднего отдела юрской системы (J_{2pr}), залегающих непосредственно на дорогомилловских известняках. В районе скважины номер 13 на обеих поверхностях явно прослеживается замкнутое понижение, которое можно идентифицировать как древнее погребенное поверхностное карстопроявление (провал или оседание).

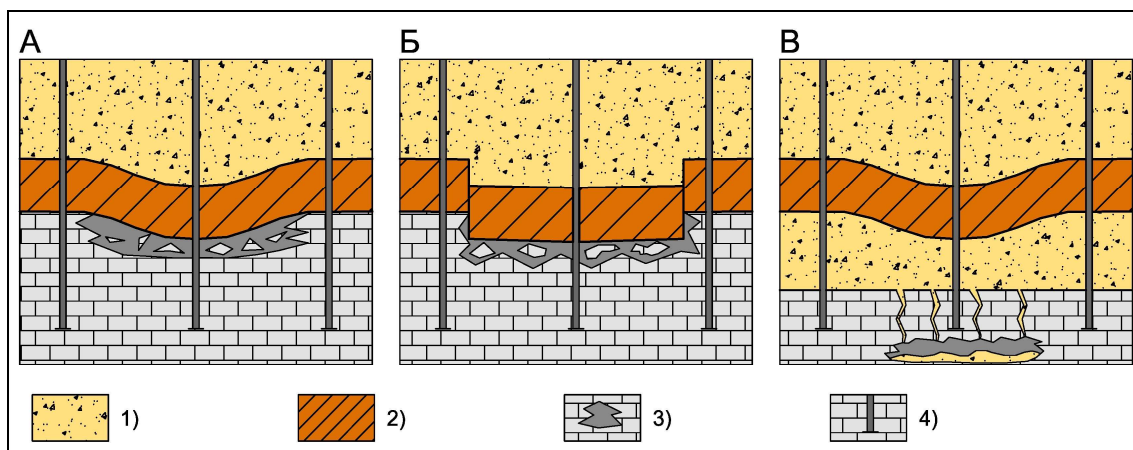


Рисунок 2.7. Характерные формы маркирующих горизонтов, сложенных глинистыми породами, внутри погребенных поверхностных карстопроявлений: А – маркирующий горизонт, претерпевший пластические деформации (прогиб грунта); Б – маркирующий горизонт, подвергшийся сдвиговым деформациям (обвал грунта); В – маркирующий горизонт, деформированный вследствие карстово-суффозионного процесса

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

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 различные деформации (рисунок 2.7). Если глинистый слой перекрывал полость, сформировавшуюся в карстующихся породах, то упрощенно он мог испытать либо прогиб (рисунок 2.7 А), либо обрушение (рисунок 2.7 Б). В первом случае глинистый слой, не теряя своей сплошности, под давлением вышележащих слоев, прогнулся внутрь полости, испытав при этом, в основном, пластические деформации. Во втором случае произошел обвал глинистых грунтов внутрь полости, при этом нарушилась целостность слоя. Основные нарушения сплошности глинистого слоя имели место по периметру контакта полости с подошвой глинистого слоя, где происходили разного рода деформации: разрывные, сдвиговые, пластические. Какого рода деформацию будет испытывать глинистый слой, зависит от его мощности и пластических свойств слагающих его грунтов, а также от геометрических параметров карстовой полости. Подробнее об этом будет сказано ниже.

Следует отметить, что подошва покрывающей толщи сможет играть роль маркирующей поверхности при поиске погребенного поверхностного карстопроявления, только если оно представляло собой оседание, как результат прогиба глинистого слоя над полостью (рисунок

2.7А), или карстово-обвальный провал (рисунки 2.1 и 2.7Б). В то же время погребенное поверхностное карстопроявление могло быть карстово-суффозионно-обвальным провалом (рисунок 2.2), карстово-суффозионным провалом фреатического типа (рисунок 2.3а) или оседанием, образовавшимся в результате суффозионного выноса несвязных пород в трещины, присутствующие в нижележащих карстующихся породах, которое англоязычными специалистами именуется «suffosion sinkhole» [99]. В этих случаях деформации покрывающей толщи не будут выражены в рельефе ее подошвы, но могут прослеживаться в вышележащих (наиболее четко в глинистых) слоях (рисунок 2.7В), и маркирующими поверхностями будут служить кровля и подошва одного или нескольких из них.

Как открытые, так и погребенные карстовые провалы и оседания имеют характерную округлую форму в горизонтальном сечении практически по всей их высоте. Для идентификации и определения местоположения погребенного поверхностного карстопроявления наиболее достоверную информацию дают результаты бурения (рисунок 2.6), хотя, конечно, скважина может в него не попасть. Сложность возникает тогда, когда требуется определение контуров и геометрических размеров этих форм. Принимается, что вертикальная ось, проходящая через центр погребенного поверхностного карстопроявления, совпадает с осью вскрывшей его скважины. Однако, это не всегда будет соответствовать действительности, ведь скважина может находиться как в центре такой формы, так и на ее краю. Точность определения контуров и центра погребенного поверхностного карстопроявления зависит от количества геологической информации, то есть, количества скважин, пробуренных внутри этого структурного элемента и рядом с ним. Чем больше скважин находится в этом месте, тем точнее можно определить размеры погребенной карстовой формы. Но и здесь есть некоторые пределы. Это касается «стандартных» расстояний между скважинами, определяемых нормативными документами в зависимости от стадии изысканий и категории сложности инженерно-геологических условий. Согласно СП 47.13330.2012 [17], для стадии «проектная документация», при сложных инженерно-геологических условиях, это расстояние не должно превышать 25 м.

Таким образом, для того что бы в контуры погребенного поверхностного карстопроявления попала более чем одна скважина, поперечные размеры этой формы должны превышать 25 м, или скважины должны располагаться в узлах сетки с шагом значительно меньше 25 м. Последнее должно быть отражено и обосновано в соответствующей программе изысканий. При этом следует руководствоваться принципом «разумной достаточности», то есть учитывать стоимость проведения подробных работ и целесообразность такой детализации. В принципе, для оценки карстоопасности территории, зачастую достаточно установить сам факт наличия погребенного провала, без определения его точных контуров.

2.2.2. Роль феномена в возможном формировании новых карстовых провалов

Наличие древних погребенных карстовых провалов на исследуемой площадке, безусловно, является признаком карстоопасности. В первую очередь это указывает на то, что новое карстовое провалообразование, на этой территории возможно в принципе, то есть для этого имеются предпосылки геологического характера. Важный момент, который отмечают многие исследователи, заключается в том, что древние карстовые провалы могут вновь «оживать» [55, 89]. Дело в том, что участки древних карстовых провалов можно охарактеризовать как ослабленные. В этих местах нарушена структурная целостность и снижена прочность как карстующихся пород, так и грунтов покрывающей толщи, в том числе водоупора. Чаще всего «оживление» погребенного карстового провала является результатом суффозионного разуплотнения и последующего гравитационного уплотнения заполняющих его несвязных пород [100], если они непосредственно контактируют с карстующимися породами.

Вместе с тем, существует еще одно обстоятельство, о котором вспоминают довольно редко. В условиях, когда между растворимыми породами и водонасыщенными несвязными породами залегает слой водонепроницаемых связных пород, высока вероятность присутствия на периферии погребенного оседания или провала сквозных нарушений сплошности водонепроницаемого слоя. Такие нарушения создают необходимые предпосылки для развития суффозии, однако обнаружить их в ходе инженерно-геологических изысканий не представляется возможным из-за их незначительных размеров в горизонтальном сечении.

Чтобы нагляднее представить какие опасности таит в себе разрушение перекрывающего полость водоупора и как это может спровоцировать повторное провалообразование, необходимо рассмотреть возможные механизмы развития таких деформаций. Достаточно подробно процесс разрушения экранирующего водоупора исследован А.В. Аникеевым [24]. На основании экспериментальных данных, он описывает две формы такого разрушения.

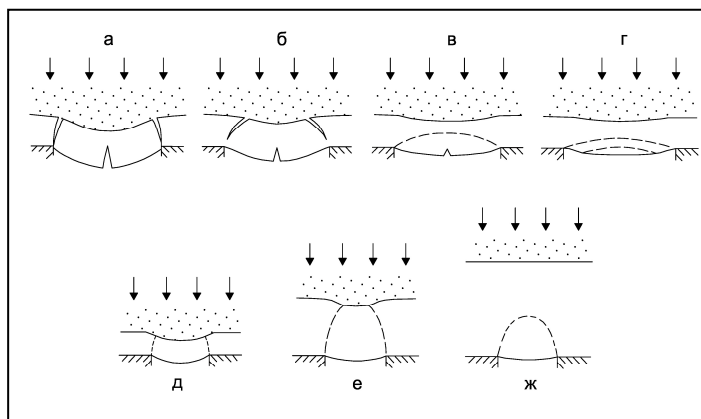


Рисунок 2.8. Первая форма деформирования-разрушения глинистых грунтов над полостью в зависимости от их консистенции [24] (а – мягкопластичные; б – тугопластичные; в – полутвердые; г – твердые) и соотношения мощности слоя (**m**) к пролету полости (**d**) (д-ж – различные соотношения **m/d**)

Первая форма заключается в прогибе глинистого слоя внутрь полости. При этом в слое образуются трещины или своды обрушения в его подошве. Автор отмечает, что амплитуда изгиба и направление трещин зависят от деформационных и прочностных характеристик глинистого слоя (рисунок 2.8). На механизм обрушения водоупора влияет и безразмерный параметр m/d представляющий собой отношение мощности водоупора к диаметру полости. Такую схему разрушения водоупора А.В. Аникеев называет классической. При этом он упоминает, что некоторые исследователи [62] предлагают несколько иную схему образования провала при соотношении $m/d \approx 1$, которая описывает срез водоупора по цилиндрической поверхности, вписанной в контур полости (рисунок 2.9). Стоит отметить, что такая схема, согласно экспериментальным данным Аникеева, относится только к уже раздробленным глинам, выпадающим в полость подобно несвязным грунтам. Однако она довольно часто применяется при оценке карстоопасности [32, 55, 63, 73, 77].

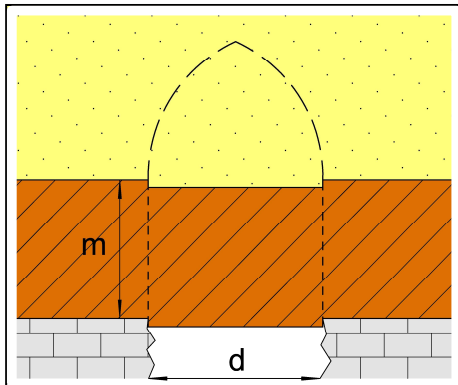


Рисунок 2.9. Схема разрушения водоупора в виде среза глинистого грунта по цилиндрической поверхности при соотношении $m/d \approx 1$. Условные обозначения см. на рисунке 2.7

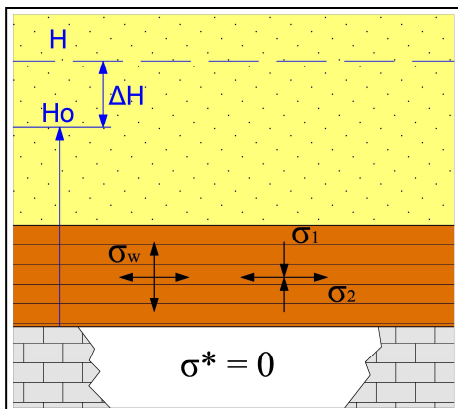


Рисунок 2.10. Вторая форма разрушения водоупора по А.В. Аникееву [24]. Схема действующих напряжений в подошве глинистого слоя при наличии под ней полости в условиях снижения напора карстовых вод: H , H_0 — уровни грунтовых и карстовых вод; σ_w — избыточное поровое давление; $\sigma_{1,2}$ — напряжения, обусловленные наличием полости; σ^* — эффективное напряжение. Остальные условные обозначения см. на рисунке 2.11

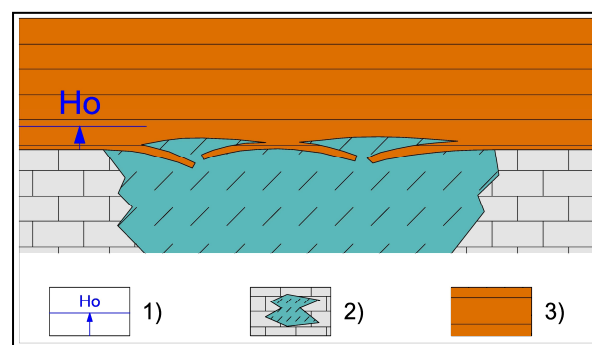
Вторая форма разрушения водоупора, подробно охарактеризованная А.В. Аникеевым, относится к глинистым грунтам, степень водонасыщения которых близка к единице. Механизм разрушения заключается в том, что при избыточном поровом давлении в грунте, возникающем при критическом снижении давления напорных карстовых вод, происходит «отстреливание» глинистых частиц с подошвы слоя и образовании в нем системы трещин. При этом, видимого

изгиба водоупорного слоя не происходит (рисунок 2.10). Указывая на то, что разрушение связано с избыточным поровым давлением в глинистом слое, А.В. Аникеев называет этот феномен «случайным гидроразрывом». В конечном итоге, водоупор полностью разрушается и, при достижении некоторого критического предела прочности, обрушивается в полость.

Существует также третья форма разрушения глинистого слоя [41] вызываемая, в противоположность второй форме разрушения, повышением уровня карстовых вод. При повышении уровня карстовых вод до подошвы глинистого водоупора происходит его замачивание и набухание, с последующим отслаиванием глинистых частиц (рисунок 2.11).

Рисунок 2.11. Третья форма разрушения водоупора по В.С. Истоминой, В.В. Буренковой и Г.В. Мишуровой [41]) – отслаивание частичек глинистого водоупора с его подошвы при замачивании напорными карстовыми водами

1) уровень карстовых вод; 2) полость в карстующихся породах, заполненная водой; 3) глинистый водоупор



Необходимо отметить, что все три формы разрушения глинистого водоупорного слоя во все не исключают друг друга, а наоборот, перечисленные процессы могут протекать одновременно, накладываясь друг на друга.

Древние погребенные провалы, образование которых сопровождалось охарактеризованными выше разновидностями разрушения глинистого водоупора, перекрывающего карстовую полость, представляют собой опасность в связи с нарушениями целостности этого слоя. В первом случае, нарушения возникают из-за образования трещин, вызванных деформациями растяжения и сжатия, или (в случае идеализированной схемы среза водоупора по цилиндрической поверхности) сдвиговыми деформациями. В любом случае, прочность и экранирующие свойства водоупора снижены. При второй и третьей формах разрушения, после образования провала, вместо водоупора остается лишь раздробленный глинистый грунт, который не может быть надежным экраном, перекрывающим карстующиеся породы.

Конечно, после разрушения водоупора и связанных с ней изменений в вышележащих грунтах, «система» может находиться в стабильном состоянии неопределенно долгое время. Однако это будет продолжаться только до тех пор, пока в геологической обстановке не произойдут изменения, способные привести к повторному провалообразованию. Таких геологических факторов может быть три:

1. Могут произойти критические изменения уровней карстовых или надкарстовых вод.

2. Карстовая полость может увеличиться в размерах за счет растворения стенок. В конечном итоге, она вновь достигнет критической емкости, при которой водоупорный покрывающий слой не сможет сдерживать давления вышележащих грунтов, что приведет к новому провалу.

3. Образовавшиеся в водоупоре трещины или каналы, через которые полость сообщается с несвязными водонасыщенными грунтами покрывающей толщи, могут со временем увеличиться в поперечном сечении, например, за счет подземной эрозии. Через них может произойти суффозионный вынос дисперсного грунта, что приведет к формированию оседания или провала.

2.3. Изменение гранулометрического состава несвязных дисперсных пород, вызванное суффозионным выносом их частиц в трещины и полости

2.3.1. Описание процесса и необходимых условий его развития

Как уже отмечалось в разделе 2.1, суффозия играет важную роль в формировании карстовых провалов, что признается всеми специалистами, однако сам этот термин трактуется по-разному, иногда взаимоисключаяще [7, 57]. Наиболее широкое определение понятия «суффозия» дано в СП 116.13330.2012 [18] и в соответствии с ним В.П. Хоменко [77] классифицирует суффозию по двум признакам, как показано на рисунке 2.12. В рамках этой понятийной системы, которой придерживается и диссертант, 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 трещины и полости, присутствующие в карстующихся породах.

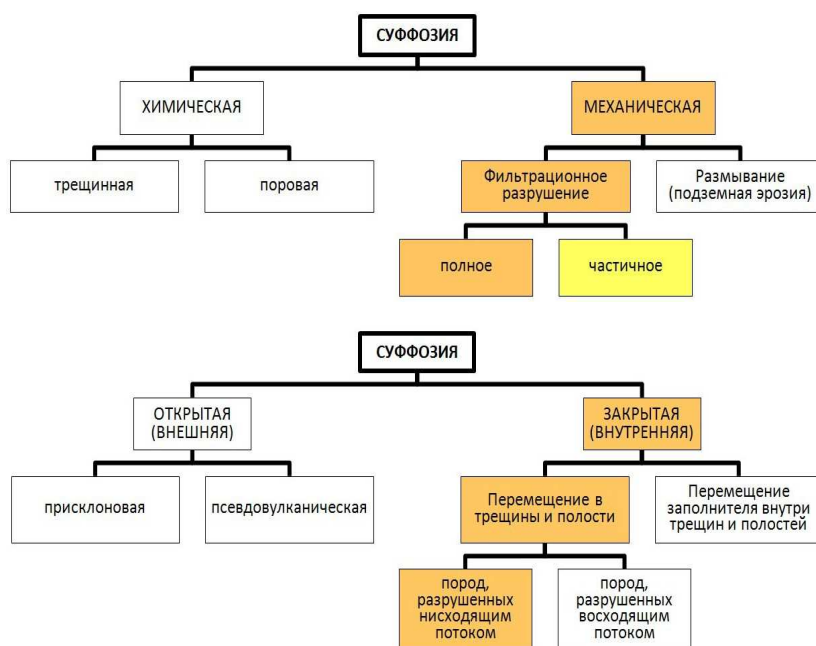


Рисунок 2.12. Классификации суффозии, предложенные В.П. Хоменко [77]: по характеру разрушения горных пород (вверху) и по условиям выноса и перемещения разрушенных пород (внизу). Выделены разновидности суффозии, обеспечивающие: а) формирование карстово-суффозионных провалов (коричневый цвет) и б) появление признаков его подготовки (желтый цвет)

Согласно В.П. Хоменко [77], полное фильтрационное разрушение несвязных пород представляет собой «...разрушение структурных связей, в результате которого порода переходит в состояние ложного плавуча..., вызванное фильтрацией и начинающееся при некоторых критических значениях ее градиента...». Однако в контексте данного исследования не менее важным представляется другое обстоятельство: существует разновидность механической суффозии, которая в определенных условиях предшествует полному фильтрационному разрушению несвязных пород покрывающей толщи и тем самым представляет собой подготовку карстово-суффозионного провалообразования. Это – частичное фильтрационное разрушение, которое В.П. Хоменко определяет как «...вынос фильтрационным потоком нерастворимых частиц сквозь поры несвязных дисперсных пород, обладающих бутовой текстурой [77]». Процесс известен и под другими названиями, например: внутренний размыв [83], непрерывная механическая суффозия [30], чистый вынос [66], микросуффозия [58], внутрипластовая механическая суффозия в скелетных породах [59], суффозия классического типа [70], собственно суффозия [68].

Иногда именно этот процесс понимают под словом «суффозия» и никакой другой суффозии не признают [40], причем такое понимание широко распространено за рубежом. В частности, то, что В.П. Хоменко называет частичным фильтрационным разрушением, германоязычными специалистами именуется Suffosion [102], а англоязычными – suffosion (или suffusion) [88]. Гораздо труднее подобрать в английском языке однозначный синоним термину «полное фильтрационное разрушение», поскольку в публикациях на эту тему данный процесс именуется piping [97], boiling [86], internal erosion [88], а также похожими на них и производными от них терминами. Отсюда нетрудно прийти к выводу что, характеризуя процесс изменения гранулометрического состава несвязных пород покрывающей толщи как подготовку карстово-суффозионного провалообразования, вполне правомерно называть его суффозионным. Согласно В.Д. Ломтадзе [57] механическая суффозия может развиваться, если будут соблюдены три условия: 1) порода, через которую осуществляется фильтрация воды, должна обладать определенной неоднородностью; 2) скорость фильтрации воды должна превышать определенную критическую величину; 3) должна существовать область разгрузки этой породы от мелких частиц.

Первое условие, необходимое для частичного фильтрационного разрушения несвязных пород, определяется их структурно-текстурными особенностями и является решающим. Необходима такая текстура несвязного грунта, именуемая бутовой, когда он состоит из тесно контактирующих друг с другом частиц (скелета), между которыми располагаются более мелкие частицы (заполнитель). Если при этом размер частиц заполнителя грунта позволяет им свободно перемещаться между частицами его скелета под действием гидродинамических сил, такой грунт именуется суффозионным.

К настоящему времени в нашей стране [74] и за рубежом [88] используется немало способов оценки суффозионности несвязных пород на основе математической обработки параметров гранулометрического состава и показателей физических свойств. Например, в России хорошо известен способ, рекомендуемый Пособием к СНиП 2.04.02-84 [8], базирующийся на разработках А.Н. Патрашева [67]. Весьма основательной и глубоко проработанной представляется методика, предложенная В.Н. Кондратьевым [43], поскольку при ее реализации используется поэтапная графоаналитическая обработка параметров грунта, а оценка дается по критериям, позволяющим идентифицировать несуффозионные грунты трех типов (рисунок 2.13). Последовательность действий, осуществляемых в соответствии с этой методикой, такова:

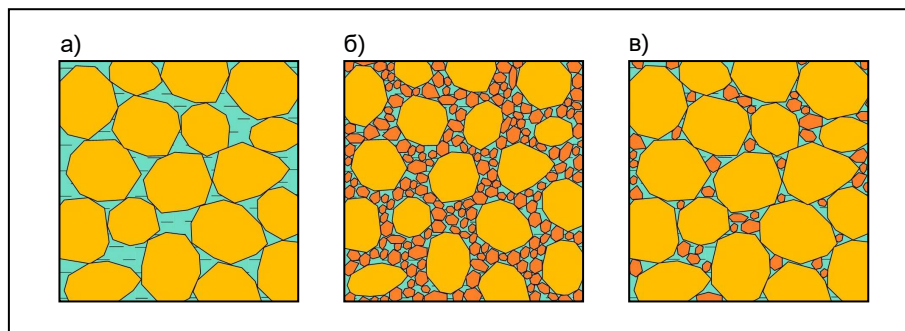


Рисунок 2.13. Основные виды несуффозионных несвязных грунтов: а) однородный; б) с псевдопорфировой текстурой; в) с отсутствием возможности свободного перемещения частиц заполнителя между частицами скелета под действием гидродинамических сил. Частицы скелета показаны желтым цветом, а заполнителя – оранжевым

1. Анализируют дифференциальную кривую гранулометрического состава грунта (рисунок 2.14), и если она имеет одну вершину, грунт считают несуффозионным, поскольку он не обладает необходимой неоднородностью и его нельзя разделить на скелет и заполнитель (рисунок 2.13а).

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

3. Осуществляют проверку соблюдения условия:

$$n_s = (e + a)/(e + 1) > 0,5, \quad (2.1)$$

где n_s – пористость скелета в долях единицы; e – коэффициент пористости грунта; a – содержание в грунте заполнителя в долях единицы. Если это условие соблюдается, грунт имеет не бутовую, а псевдопорфировую текстуру и его считают несуффозионным (рисунок 2.13б).

4. На одном графике (рисунок 2.14) строят две интегральные кривые гранулометрического состава: для заполнителя и для скелета грунта. Затем определяют один характерный диаметр частиц заполнителя (d_{70}) и три характерных диаметра частиц скелета (D_{60} , D_{50} и D_{10}).

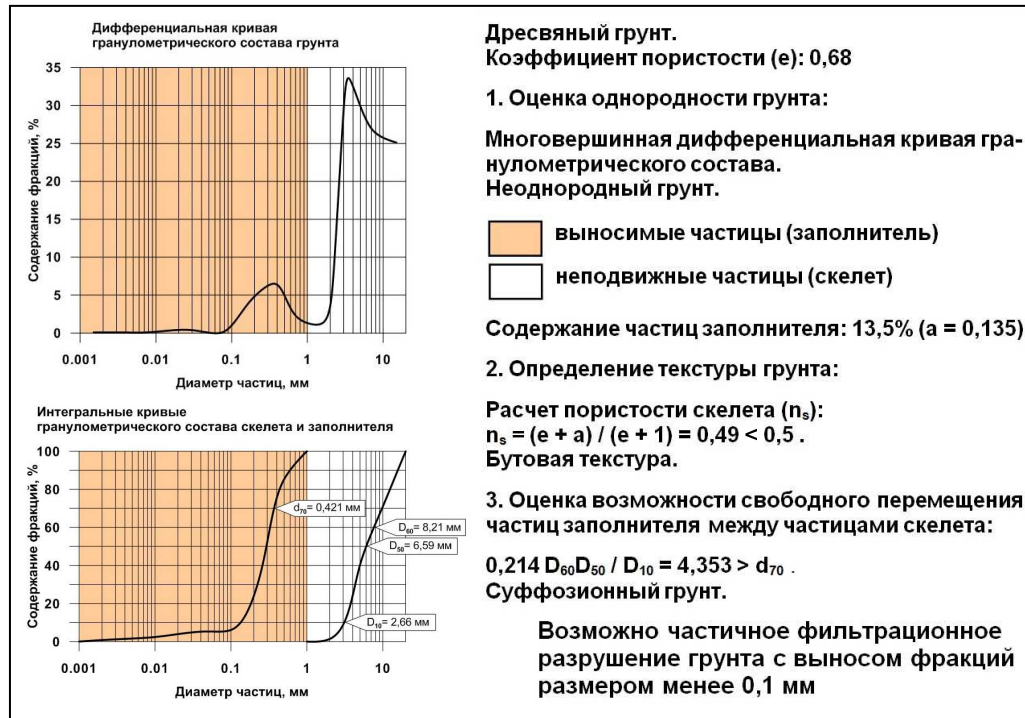


Рисунок 2.14. Паспорт грунта, использованного в качестве материала модели при экспериментальном изучении суффозионного процесса (см. подраздел 2.3.3)

5. Осуществляют проверку соблюдения условия:

$$0,214 D_{60} D_{50} / D_{10} < d_{70} , \quad (2.2)$$

где D_{60} – диаметр, который не превышают 60% частиц заполнителя, мм; D_{50} – диаметр, который не превышают 50% частиц заполнителя, мм; D_{10} – диаметр, который не превышают 10% частиц заполнителя, мм; d_{70} – диаметр, который не превышают 70% частиц скелета, мм. Если это условие соблюдается, частицы заполнителя не имеют возможности свободного перемещения между частицами скелета грунта под действием гидродинамических сил, поэтому грунт считают несущим (рисунок 2.13в).

По результатам оценки составляется паспорт грунта, содержащий все необходимые исходные данные, результаты расчетов по формулам (2.1) и (2.2) и окончательный вывод о его суффозионности. Образец такого паспорта показан на рисунке 2.14.

Второе условие, необходимое для частичного фильтрационного разрушения несвязных пород, характеризует движущую силу этого процесса: частицы заполнителя могут начать перемещение между частицами скелета суффозионного грунта только тогда, когда скорость фильтрации через него воды достигнет некоторой величины. В настоящее время сложилось

четкое представление о критическом гидравлическом градиенте развития механической суффозии, который чаще всего определяется в лабораторных условиях на образцах грунтов с помощью прибора КГС-2 конструкции В.Н. Славянова [34]. По мере нарастания градиента фильтрации в образце суффозионного грунта заполнитель приходит в движение при его значениях, измеряемых десятками долями единицы, при этом в приборе фиксируется увеличение водопроницаемости образца как результат прогрессирующего выноса заполнителя (рисунок 2.15). Затем при величинах, превышающих единицу, начинается полное фильтрационное разрушение суффозионного грунта. В несуффозионных несвязных грунтах (рисунок 2.13) в ходе роста фильтрационного градиента возникает только их полное фильтрационное разрушение, причем до этого момента их водопроницаемость не изменяется.

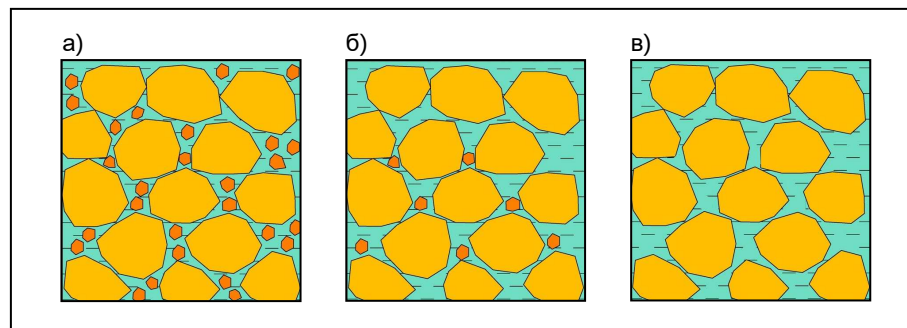


Рисунок 2.15. Динамика суффозионного выноса заполнителя в ходе фильтрации воды: а) суффозионный грунт; б) суффозионный грунт, частично лишенный заполнителя; в) несвязный грунт, полностью лишенный заполнителя и переставший быть суффозионным (см. рисунок 2.13а). См. примечание к рисунку 2.13

Таким образом, прибор КГС-2 позволяет не только определять критический градиент появления суффозии как численно выражаемый параметр суффозионной устойчивости грунта, но и оценивать его суффозионность. Эти возможности прибора позволяют использовать его как эффективный инструмент оценки карстовой опасности [75, 84], однако для решения поставленных диссертантом задач его применение нецелесообразно. Во-первых, предлагаемая методика не оперирует величиной критического градиента появления суффозии, а во-вторых, она не предусматривает использование нестандартного оборудования, каковым является прибор КГС-2.

Третье условие, необходимое для частичного фильтрационного разрушения несвязных пород, требует существования возможности транспортировки частиц заполнителя в некоторые емкости-приемники. Подробно рассматривать это условие применительно к подготовке карстово-суффозионного провалообразования не имеет смысла, поскольку заранее предполагается, что в кровле карстующихся пород или в перекрывающем ее водоупоре существуют трещины, которые сообщаются с полостью, способной принять достаточный объем перемещенных

частиц. Во всяком случае, на современном техническом уровне инженерно-геологических изысканий поиск таких форм и точная оценка их параметров невозможны.

2.3.2. Процесс, как начальная стадия формирования карстово-суффозионного провала

Для перемещения мелких частиц несвязных пород покрывающей толщи сквозь поровое пространство требуется сила водного потока. Конечно, эти частицы могут перемещаться вниз с помощью силы гравитации, однако их движение будет ограничено встречающимися на пути гранями и неровными поверхностями крупных зерен. Таким образом, гравитационное нисходящее движение мелких частиц возможно лишь при их хорошей окатанности и наличии достаточно крупных пор: только в этом случае мелкие зерна будут свободно «проваливаться» сквозь крупные, что характерно для идеальных или искусственных сред. В природных условиях, при сопоставимых размерах мелких и крупных зерен грунта, более или менее свободное движение мелких частиц возможно лишь при фильтрации воды, что не позволяет мелким частицам застревать между крупными и сносит их дальше по направлению потока.

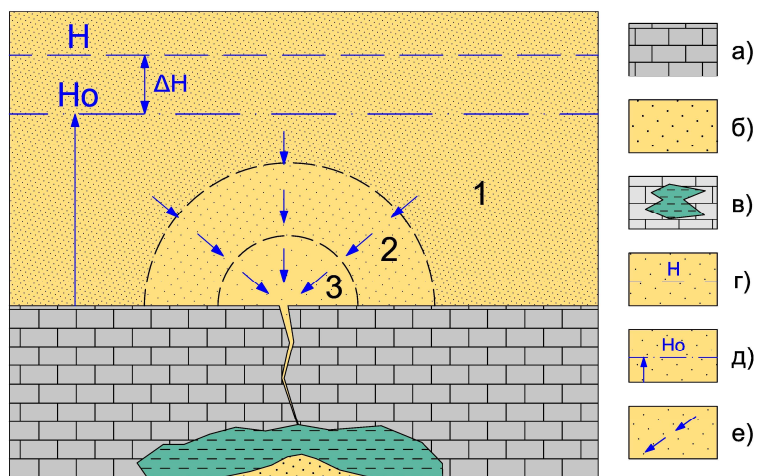
Перемещаемые подземным потоком частицы, в конечном итоге, должны попасть через трещины или каналы в некое пустотное пространство – полость-приемник. Это может быть карстовая полость или система трещин, пронизывающих карстующиеся породы. Причем, для частичного фильтрационного разрушения, сечение входного отверстия в открытый канал или трещину должно быть соизмеримо с размером частиц грунта. Если ширина канала значительно превышает размер частиц, то суффозия будет протекать по схеме полного фильтрационного разрушения грунта, в виде так называемого «выпора». При этом будет перемещаться целиком масса грунта, а не его отдельные компоненты.

Процесс суффозионного выноса мелких частиц грунта протекает, когда уровень надкарстовых вод занимает более высокое положение относительно уровня карстовых вод. При небольших градиентах, составляющих несколько десятых долей единицы, создаются условия для свободного перемещения мелких частиц грунта. При градиентах, близких к единице, фильтрационным потоком перемещаются не только мелкие, но и крупные частицы, а грунт переходит в псевдоплавучее состояние.

В ходе суффозии перераспределение частиц в толще грунта происходит неравномерно. Их движение зависит от скорости подземного потока, которая возрастает по мере приближения к входному отверстию канала или трещины. Согласно исследованиям, проведенным В.П. Хоменко [75], в массиве грунта, в котором начался суффозионный процесс, связанный с будущим провалообразованием, можно выделить три зоны (рисунок 2.16):

Рисунок 2.16. Схема условного зонирования водонасыщенной песчаной толщи, измененной карстово-суффозионным процессом, по гранулометрическому составу (описание зон дано в тексте)

а) – трещиноватые карстующие породы; б) – песчаные грунты; в) – карстовая полость; г) – уровень надкарстовых вод; д) – уровень напорных карстовых вод; е) – направление фильтрационного потока



Зона 1 отвечает первоначальному, не затронутому суффозией, состоянию грунтового массива: гранулометрический состав грунта в ней не изменен (рисунок 2.15а). Она находится на значительном удалении от карстовой трещины или канала.

Зона 2 расположена в относительной близости к карстовому каналу и представлена грунтами, чей гранулометрический состав был заметно изменен суффозионным процессом, то есть значительная часть мелких частиц была удалена подземным потоком (рисунок 2.15б).

Зона 3 находится непосредственно у входного отверстия карстового канала: в ней гранулометрический состав грунтов радикально изменен суффозией и характеризуется практически полным отсутствием пылевато-глинистых частиц. Фактически, грунты этой зоны перестают быть суффозионными (рисунок 2.15в).

Разумеется, четких границ, разделяющих эти три зоны, не может быть в принципе. Контуры зон проведены условно, содержание мелких частиц в массиве изменяется плавно, уменьшаясь по мере приближения к входному каналу. Тем не менее, ничто не мешает определить некоторые критерии для выделения этих зон. Представляется вполне справедливым принять за переход от третьей ко второй зоне снижение содержания пылевато-глинистых частиц на 30-40% от первоначальных, фоновых значений. Остаток таких частиц в количестве 10-20% от фоновых значений, можно принять за показатели, соответствующие первой зоне.

Единственным способом получения информации о гранулометрическом составе грунтов является бурение скважин с отбором проб, причем качество анализа будет пропорционально их количеству. Необходимо также отметить, что невозможность определения четких контуров этих зон, не является препятствием для использования данного феномена в качестве прогностического признака подготовки карстово-суффозионного провалообразования. Более того, сопоставив результаты анализа гранулометрического состава несвязных грунтов и данные о суще-

ствующих или ожидаемых уровнях подземных вод, можно оценить динамику развития процесса.

Изменение гранулометрического состава несвязных пород покрывающей толщи, вызванное суффозионным выносом их частиц в трещины и полости, представляет собой лишь начальную стадию карстово-суффозионного провалообразования. Для формирования провала необходим переход от частичного к полному фильтрационному разрушению, что может произойти по двум причинам. Во-первых, этому способствует увеличение поперечного размера канала, или трещины, ведущей в карстовую полость. Это относится к каналам как в самих карстующихся, так и в перекрывающих их глинистых породах. Во-вторых, может быть достигнута критическая величина скорости потока, при наступлении которой, он способен перемещать не только отдельные зерна, но и массу грунта целиком. В условиях формирования карстово-суффозионных провалов фреатического типа (рисунок 2.3а) это происходит по причине повышения уровня надкарстовых вод, либо снижения уровня карстовых вод, либо того и другого одновременно. Карстово-суффозионное провалообразование вадозного типа (рисунок 2.3б) обеспечивается увеличением инфильтрации воды в карстующиеся породы.

Согласно лабораторным экспериментам [77], разрушение водонасыщенных несвязных грунтов нисходящим фильтрационным потоком, разгружающимся в полость-приемник, происходит следующим образом: с увеличением его скорости образуется псевдоплавунная зона, которая с ростом принимает форму вытянутого по вертикали эллипсоида. По мере того как грунт перемещается в полость, внутри и на верхней границе псевдоплавунной зоны образуются временные неустойчивые полости, не заполненные водой. Псевдоплавунная зона перестает расти вверх при достижении водоупорного слоя или свободной поверхности надкарстовых вод, после этого она растет только в ширину и принимает форму перевернутого вершиной вниз параболоида вращения. Над этой, увеличившейся в размерах, псевдоплавунной зоной происходит обрушение вышележащих грунтов, которое может вызвать образование провала (рисунок 2.3).

Фильтрационное разрушение несвязных грунтов, как частичное, так и полное, приводит к их разуплотнению, то есть, к увеличению объема пустотного пространства в грунтах. Различие только в том, что при частичном фильтрационном разрушении увеличивается общий объем пор между частицами грунта, тогда как при полном фильтрационном разрушении, образуются ещё и полости в самом массиве. О способах обнаружения разуплотненных зон будет идти речь в подразделе 2.4.2.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что при отсутствии перекрывающего водоупора (или нарушении его целостности), уменьшение содержания мелких частиц в несвязных суффозионных грунтах, слагающих нижнюю часть покрывающей толщи, может служить про-

гностическим признаком подготовки карстово-суффозионного провалообразования. Если же эти грунты несущими, возможность такого прогноза отсутствует.

2.3.3. Экспериментальные исследования суффозионного изменения гранулометрического состава несвязных дисперсных пород

Моделирование процесса механической суффозии выполнялось на упрощенном и уменьшенном рабочем образце экспериментальной установки конструкции В.П. Хоменко, Е.П. Маханько, Е.И. Исаева и др. [77], общий вид которой показан на рисунке 2.17. **Цель эксперимента** – смоделировать суффозионный вынос мелких частиц несвязного грунта нисходящим фильтрационным потоком в полость-приемник и изучить, как изменяются параметры грунта в массиве относительно исходного состояния.



Рисунок 2.17. Экспериментальное оборудование

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 рабочих; 5 – дно рабочей камеры; 6 – прорезь, имитирующая карстовый канал; 7 – перепускная трубка; 8 – трубки, соединяющие боковые камеры; 9 – дренажные трубки нижней камеры

Методика проведения эксперимента. Рабочая камера размером 32×20×17 см послойно заполнялась материалом модели с несильным уплотнением на высоту 16 см. Материал модели представлял собой искусственную двухкомпонентную смесь (скелет и заполнитель), состоящую из дресвяного грунта (порядка 85%) с добавлением песка средней крупности (до 15%). Параметры исходного материала представлены в таблице 2.3. Плотность грунта определялась методом режущего кольца объемом 140 см³, остальные параметры получены методом расчета. Гранулометрический состав всех 13 образцов определен лабораторным методом, согласно требованиям нормативных документов [1, 2].

Еще до проведения опыта была осуществлена оценка суффозионности материала модели (исходного грунта) по методике В.Н. Кондратьева [43], усовершенствованной П.И. Фадеевым [74] (см. подраздел 2.3.1). Если бы материал модели оказался несущим, эксперимент терял бы смысл. Паспорт исходного грунта, послужившего материалом модели, представлен на рисунке 2.14. Оценка показала, что исходный грунт имеет трехвершинную дифференциальную кривую гранулометрического состава, из которых две правые выражены наиболее контрастно. Был сделан вывод о том, что заполнитель сложен частицами размером менее 1 мм. Расчет показал, что материал модели (исходный грунт) имеет бутовую текстуру, и частицы заполнителя имеют возможность свободного перемещения между частицами скелета грунта под действием гидродинамических сил, то есть материал модели является суффозионным.

Таблица 2.3. Параметры материала модели до и после эксперимента (коричневым цветом закрашены ячейки с процентным содержанием частиц заполнителя)

№ образца	Содержание частиц, %												Суммарное содержание заполнителя %	Степень неоднородности грансостава	Плотность частиц грунта, г/см ³	Влажность, %	Плотность грунта, г/см ³	Плотность сухого грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Степень влажности, д.е.	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011
	свыше 10 мм	10 - 5 мм	5 - 2 мм	2 - 1 мм	1 - 0,5 мм	0,5 - 0,25 мм	0,25 - 0,10 мм	0,10 - 0,05 мм	0,05 - 0,01 мм	0,01 - 0,005 мм	0,005 - 0,002 мм	менее 0,002 мм									
	A ₁₀	A ₅	A ₂	A ₁	A _{0,5}	A _{0,25}	A _{0,1}	A _{0,05}	A _{0,01}	A _{0,005}	A _{0,001}	A ₀	Σ	C _u	ρ _s	W	ρ	ρ _d	e	S _r	
1	27,4	25,5	33,2	1,4	1,1	6,2	4,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	12,5	16,98	2,65	4,5	1,65	1,58	0,68	0,18	Дресв.грунт
2	26,1	28,9	32,3	1,0	1,5	4,6	3,6	1,3	0,4	0,1	0,1	0,1	11,7	15,53	2,65	4,7	1,65	1,58	0,68	0,18	Дресв.грунт
3	26,2	28,5	32,5	1,1	1,7	4,8	3,4	1,3	0,2	0,1	0,1	0,1	11,7	15,16	2,65	4,6	1,65	1,58	0,68	0,18	Дресв.грунт
4	21,8	26,1	37,9	1,5	2,1	5,7	4,0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	12,7	13,75	2,65	4,7	1,65	1,58	0,68	0,18	Дресв.грунт
5	20,3	22,9	39,0	1,6	2,6	7,1	4,7	0,9	0,3	0,4	0,1	0,1	16,2	15,27	2,65	5,0	1,66	1,58	0,68	0,20	Дресв.грунт
6	26,1	23,8	34,7	1,5	2,1	6,0	3,9	1,2	0,3	0,2	0,1	0,1	13,9	16,66	2,65	5,3	1,66	1,58	0,68	0,21	Дресв.грунт
7	25,8	24,4	34,0	1,4	2,3	6,3	3,9	1,3	0,3	0,1	0,1	0,1	14,4	17,02	2,65	5,5	1,67	1,58	0,67	0,22	Дресв.грунт
8	17,4	23,1	40,2	1,9	2,8	7,3	4,6	2,0	0,2	0,3	0,1	0,1	17,4	14,92	2,65	5,8	1,67	1,58	0,68	0,23	Дресв.грунт
9	29,8	21,6	34,5	1,4	2,1	5,9	3,8	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	12,7	16,10	2,65	6,1	1,68	1,58	0,67	0,24	Дресв.грунт
10	26,1	24,4	35,2	1,5	2,1	5,6	3,7	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1	12,8	15,26	2,65	9,1	1,72	1,58	0,68	0,35	Дресв.грунт
11	21,4	25,3	39,8	1,8	2,2	5,2	3,0	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	11,7	10,31	2,65	9,3	1,73	1,58	0,67	0,37	Дресв.грунт
12	24,5	25,4	36,2	1,4	2,3	5,7	3,4	0,6	0,1	0,2	0,1	0,1	12,5	14,15	2,65	9,4	1,73	1,58	0,68	0,37	Дресв.грунт
13	25,1	26,6	33,6	1,2	2,0	6,5	4,2	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	13,5	16,28	2,65	4,7	1,65	1,58	0,68	0,18	Дресв.грунт (исходный материал)



Рисунок 2.18. Схема отбора образцов материала модели из рабочей камеры экспериментальной установки после проведения опыта (слева) и используемые для этого инструменты (справа)

Следующим шагом было заполнение 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 шириной 5 мм из рабочей камеры в нижнюю, вынося с собой частицы грунта. Отток воды из нижней камеры происходил через сливные трубки, не давая камере наполниться до уровня верхней перегородки. Спустя 3 минуты, подача воды прекращалась, и происходил ее свободный слив через прорезь до осушения всех камер. Длительность слива составляла 3 минуты. После проведения трех циклов «налив – поддержание уровня – слив» из материала модели отбирались пробы для определения гранулометрического состава в количестве 12 штук. Отбор проб осуществлялся по условной сетке 3×4 ячейки, в строго определенных пронумерованных «ячейках» размером 10,5×4,0 см. Для отбора использовались металлическая лопатка (шпатель) и пластиковые перегородки шириной 4 см и длиной 17 см (рисунок 2.18).

Результаты определения гранулометрического состава и коэффициента пористости (ϵ) образцов, отобранных из материала модели до и после проведения опыта, приведены в таблице 2.3. Для каждого образца была построена дифференциальная кривая гранулометрического состава и определена степень его неоднородности (C_u): соответствующие графики представлены на рисунке 2.19. На всех графиках показана граница между заполнителем и скелетом, которая была установлена при оценке суффозионности исходного грунта, что позволило определить процентное содержание заполнителя в каждой пробе (таблица 2.3).

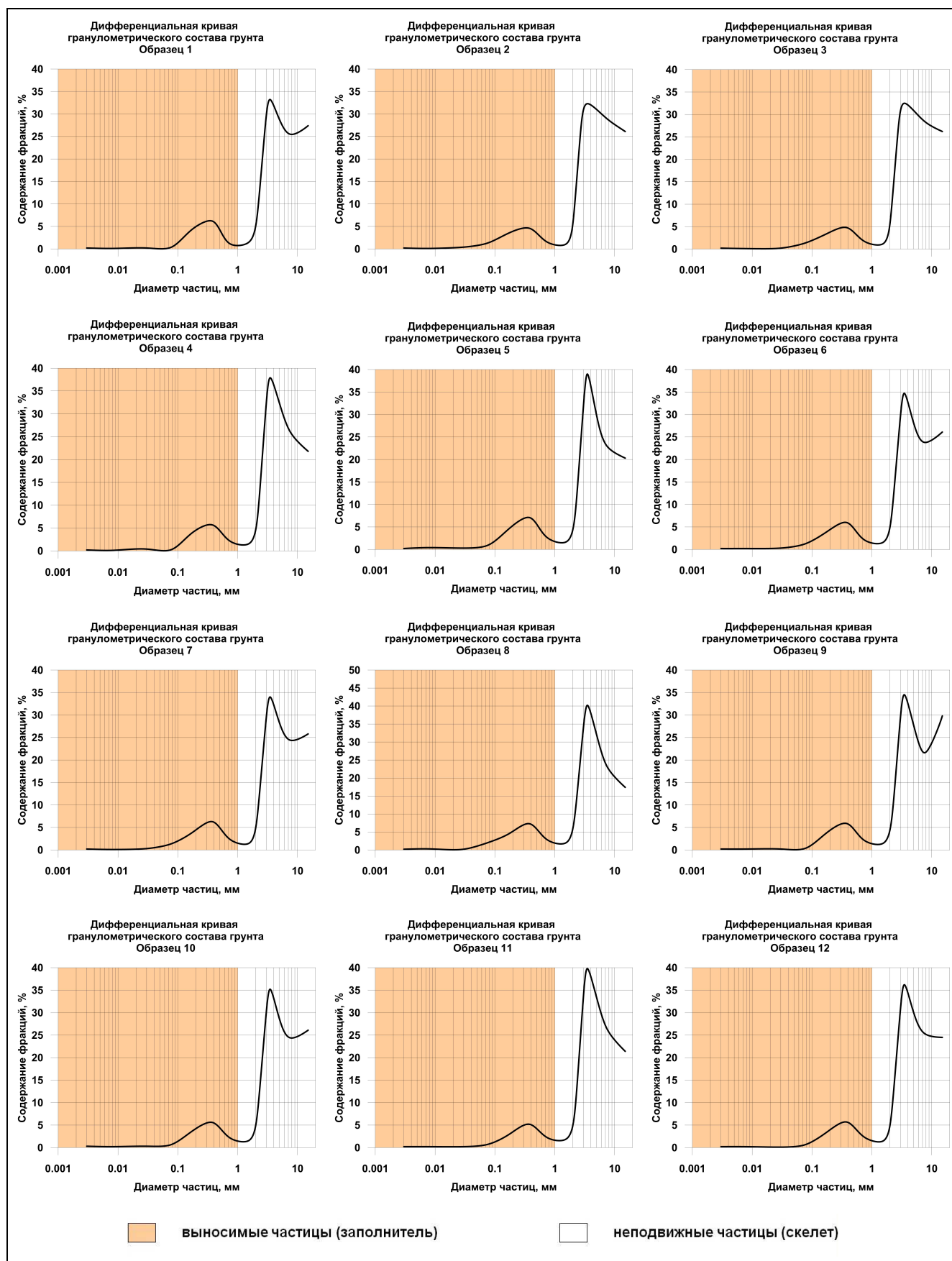


Рисунок 2.19. Дифференциальные кривые гранулометрического состава грунтов, отобранных из рабочей камеры по окончании эксперимента (см. рисунок 2.18)

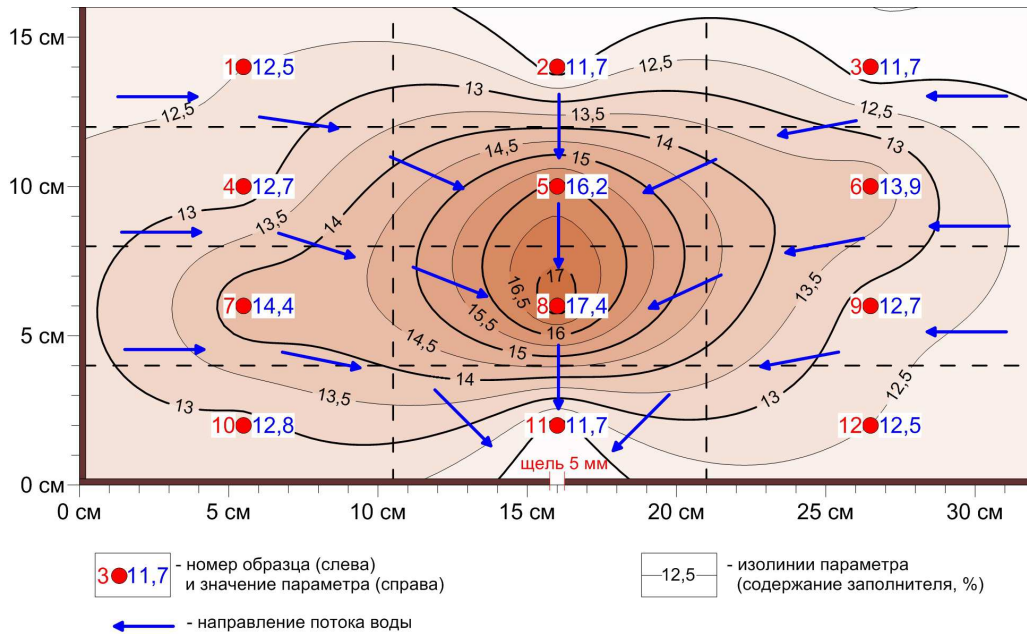


Рисунок 2.20. Пространственное распределение заполнителя после проведения опыта

По результатам эксперимента вначале было проанализировано пространственное распределение в вертикальной плоскости процентного содержания заполнителя, с целью проверки теоретической схемы, показанной на рисунке 2.16 (см. подраздел 2.3.2). Результат, представленный на рисунке 2.20, свидетельствует о большом скоплении заполнителя в центральной части рабочей камеры и его малом количестве в верхних слоях и внизу, над прорезью, имитирующей карстовую трещину. Скопление заполнителя в центре объясняется характером движения фильтрационного потока при насыщении водой материала модели, так как поток в это время движется почти горизонтально от боковых 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, где расположен вход в полость-приемник. Малое количество заполнителя в центре нижнего слоя закономерно объясняется самыми высокими значениями фильтрационного градиента, и соответственно, самым интенсивным выносом заполнителя в полость-приемник.

С уверенностью можно сказать, что в натуральных условиях, представленная в виде изолиний картина распределения заполнителя была бы иной. При доминировании вертикальной составляющей фильтрационного потока над горизонтальной, она имела бы вид семейства полуэллиптических линий, концентрически расходящихся от входа в карстовый канал. Количество заполнителя уменьшалось бы, вплоть до его полного выноса, с приближением к полости-приемнику, в целом соответствуя теоретической схеме (рисунок 2.16).

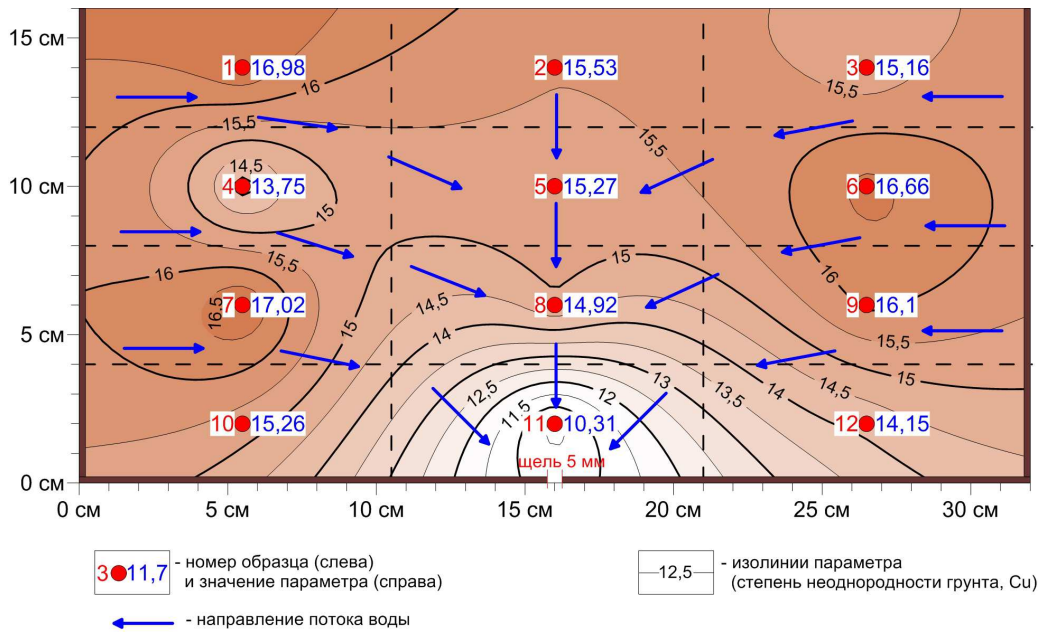


Рисунок 2.21. Пространственное распределение степени неоднородности (C_u) грунта после проведения опыта

Картина пространственного распределения значений степени неоднородности грунта (C_u) показывает практически линейную зависимость этого параметра от расстояния между точкой его замера до входа в полость-приемник (рисунок 2.21). Величина C_u тем меньше, чем ближе находится образец к прорези, поскольку грунт становится более однородным за счет суффозионного выноса заполнителя.

Таким образом, можно утверждать, что определенная картина пространственного распределения процентного содержания заполнителя в суффозионном грунте, слагающем нижнюю часть покрывающей толщи, и степени его неоднородности могут служить признаками подготовки карстово-суффозионного провалообразования.

2.4. Разупрочнение дисперсных пород над карстовой полостью

2.4.1. Описание процесса и признаки его развития

Наличие карстовой полости вблизи подошвы покрывающей толщи может привести к её обрушению и образованию провала на земной поверхности. Обрушению полости предшествуют изменения в вышележащих грунтах покрывающей толщи, выраженные в формировании так называемых «ослабленных зон» и характеризующиеся снижением прочности грунтов. Этот факт не раз упоминался в научно-технической литературе [26, 55, 69]. Связаны такие изменения с разрядкой нормальных напряжений в вышележащих грунтах при формировании полости [27], причем, изменение напряженного состояния массива происходит не только по контуру полости, но и у поверхности земли (рисунок 2.22). Такие аномальные зоны легко обнаруживаются при

помощи статического либо динамического зондирования по характерному снижению сопротивления грунта погружению в него конуса зонда [44, 76, 93]. С глубиной, сопротивление грунта конусу должно увеличиваться, что соответствует условиям естественного осадконакопления, но чем ближе к аномальной зоне, тем сильнее падают показатели сопротивления грунта.

Рисунок 2.22. Распределение (в изолиниях) нормальных максимальных (а) и минимальных (б) напряжений в породах над карстовой полостью под действием сил гравитации (по А.В. Аникееву и др. [27])

Напряжения отнесены к величине γh (γ – удельный вес пород мощностью h с коэффициентом бокового распора 0,3, перекрывающих полость шириной l)

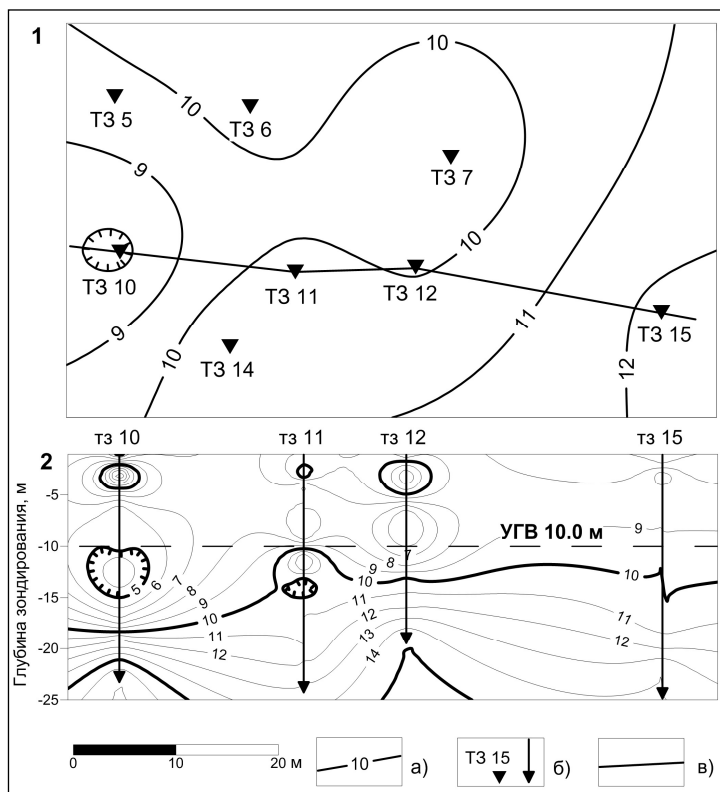
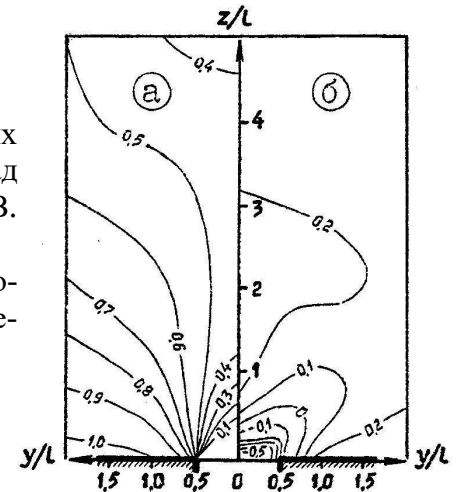


Рисунок 2.23. Распределение показателя сопротивления грунта погружению конуса зонда (q , МПа) на карстоопасном участке в северо-западной части Москвы [49]: 1) распределение в горизонтальной плоскости величины q , осредненной по всей глубине зондирования; 2) распределение сглаженных значений величины q в вертикальной плоскости

а) – изолиния величины q , МПа; б) – точка статического зондирования и ее номер; в) – линия вертикального разреза в плане. Замкнутыми контурами с направленными внутрь ортогональными штрихами показаны зоны аномально низких значений q

Массив грунта представляет собой трехмерное пространство, свойства которого, согласно концепции поля геологического параметра [29], можно косвенно выразить через показатели сопротивления грунта при динамическом или статическом зондировании. Для первого, это условное динамическое сопротивление грунта (R_d , МПа), для второго это лобовое сопротивление на

конусе зонда (q , МПа). Визуализация пространственного распределения этих параметров в массиве может осуществляться с помощью не только трехмерных, но и двухмерных моделей, построенных либо в вертикальной, либо в горизонтальной плоскостях, методом интерполяции (рисунок 2.23) или с помощью тренд-анализа.

Однако, в реальности, грунтовый массив, в большинстве случаев, сложен неоднородными грунтами. Дисперсные грунты могут различаться по литологическому составу, степени водонасыщения и другим признакам. Следовательно, можно рассматривать картину пространственного распределения показателей зондирования не только по всей исследуемой им глубине, но и по отдельным интервалам относительно глубины залегания. Критериями выделения интервалов для построения модели могут служить:

- литологический состав (к примеру, глинистая пачка и песчанистые грунты рассматриваются отдельно);
- гранулометрический состав грунта (толщу мелких и пылеватых песков следует рассматривать отдельно от крупных и гравелистых);
- положение уровня грунтовых вод (пески зоны аэрации и зоны насыщения).

У такого подхода, подразумевающего дифференциацию грунтовой толщи на неформальные интервалы, есть четкое обоснование:

1. Показатели лобового сопротивления для глинистых и песчанистых грунтов будут сильно различаться, и совместный анализ может привести к неверной интерпретации снижения величины сопротивления грунта при зондировании. То же самое касается и различных по гранулометрическому составу песков: для пылеватых, показатели лобового сопротивления грунта при равной плотности сложения, будут заведомо ниже, чем для крупных.

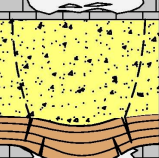
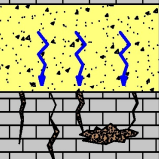
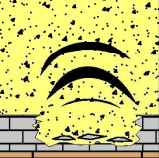
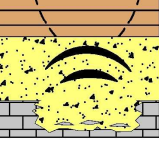
2. Процессы разрушения глинистых и песчанистых грунтов происходят по-разному. В песчаной толще основное разрушение грунтов происходит за счет суффозии: вымывание мелких частиц приводит к увеличению пористости грунта, то есть к его «разуплотнению». Деформации глинистых грунтов происходят за счет разрушения структурных связей (которых, кстати, практически нет в песчаных грунтах) между частицами, что приводит к снижению прочности грунта, или «разупрочнению».

3. Суффозионное разрушение песчаных грунтов в зоне насыщения происходит намного интенсивнее, чем в зоне аэрации. В зоне насыщения движение частиц грунта обусловлено наличием потока подземных вод в направлении карстового канала или трещины, ведущей к полости-приемнику или развитой сети трещин. Выше уровня грунтовых вод перемещение частиц связано с инфильтрацией атмосферных осадков в толщу грунта или же с утечками из водонесущих коммуникаций. Таким образом, причины разуплотнения грунтов, выше и ниже уровня

грунтовых вод, могут быть различными. Именно поэтому, представляется целесообразным раздельный анализ полей сопротивления конусу зонда в зоне насыщения и в зоне аэрации.

2.4.2. Процесс, как подготовка обрушения дисперсных пород над карстовой полостью

Как было сказано выше, в грунтах покрывающей толщи, вследствие карстовых и карсто-во-суффозионных процессов, формируются различного рода ослабленные зоны. В зависимости от характера покрывающих грунтов, в них происходят разные по своей природе процессы. В связных грунтах преобладающим процессом является разупрочнение, в несвязных – разуплотнение. На рисунке 2.24 представлена классификация ослабленных зон, которые могут формироваться в покрывающей толще, в зависимости от преобладающего в них процесса деструкции. Также, в ней указаны инженерно-геологические методы, с помощью которых можно определить наличие аномальной зоны и идентифицировать её генезис.

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

Согласно одному из возможных механизмов провалообразования, при соотношении мощности водоупора к диаметру полости m/d примерно равном 1, разрушение водоупора происходит по вертикальной плоскости имеющей вид цилиндра, диаметр которого соответствует контуру полости (рисунок 2.9). До образования провала, в толще водоупора происходит изменение естественных полей напряжений, которое вызвано ростом полости. Такие изменения будут регистрироваться в толще водоупора, но не будут отражены в вышележащих грунтах, так как значительной деформации кровли водоупора не произошло. График зондирования в этом случае будет показывать сниженные, по сравнению с фоновыми, показатели лобового сопротивления грунта (q или R_d) именно в интервале залегания глинистого слоя.

Если мощность водоупора меньше сечения полости, то деформация водоупора может проявиться в его прогибе внутрь полости. В зависимости от его мощности и консистенции слагающих его грунтов, прогиб будет выражен больше или меньше. Такая деформация влечет изменения, как в самом водоупорном слое, так и в вышележащих грунтах. На графике зондирования падение показателей сопротивления грунта может прослеживаться практически до поверхности земли. Кроме того, о деформации глинистого водоупора можно судить по характерной форме его кровли в виде понижения (см. раздел 2.1).

Очевидно, что представленные выше деформации водоупора не обязательно должны происходить изолированно друг от друга. В природных условиях, они чаще всего, наоборот, протекают параллельно. Кроме того, в процессе разрушения водоупора могут участвовать процесс отслоения частичек с его подошвы (рисунок 2.11) или происходить случайный гидроразрыв (рисунок 2.10), но эти формы разрушения недоступны для обнаружения методами, которые описываются в данном разделе, и поэтому не включены в настоящую классификацию.

Разуплотнение. В районах, где покрывающая толща сложена несвязными грунтами, а глинистый водоупор, перекрывающий карстующиеся породы, отсутствует или нарушена его целостность, могут формироваться карстово-суффозионные и смешанные (карстово-суффозионно-обвальные) провалы [69]. Используя несколько иную терминологию, можно выразиться и так: в этих условиях будут развиваться карстово-суффозионный и карстово-суффозионно-обвальный процессы.

Для карстово-суффозионного процесса характерно как частичное, так и полное фильтрационное разрушение. В первом случае происходит механический перенос частиц грунта потоком подземных вод в полость-приемник через карстовые трещины и каналы. При этом структура грунта не претерпевает значительных изменений, но происходит увеличение порового пространства между зернами (снижение плотности грунта) и характерные изменения гранулометрического состава (см. раздел 2.3). Во втором случае, при полном фильтрационном разрушении, образуется псевдоплывун, и в полость выносятся определенный объем грунта, а не отдельные

его частицы. Это приводит не просто к увеличению пористости грунта, а к нарушению его структурной целостности, с образованием полостей обрушения. В обоих случаях, снижение плотности грунта, его разуплотнение, можно обнаружить по характерному падению показателей лобового сопротивления грунта при зондировании. Только во втором случае, при полном фильтрационном разрушении, это снижение будет проявляться более интенсивно, что отразится на кривых графика зондирования.

Карстово-суффозионно-обвальный процесс проявляется в обрушении кровли полости и перемещении массы вышележащего грунта внутрь нее. При этом в вышележащих несвязных грунтах образуются полости обрушения, которые могут быть расположены очень близко к земной поверхности. Механизм такого процесса схож с полным фильтрационным разрушением, и отличается только масштабом проявления. Образование полостей обрушения в несвязных грунтах, по сути, тоже является разуплотнением, только более ярко выраженным, чем при суффозионных процессах. Скорость развития обвального процесса зависит от ширины полости, мощности перекрывающих несвязных грунтов, отсутствия или наличия горизонта надкарстовых вод и положения его уровня, а также от положения уровня карстовых вод. Как правило, такой тип разрушения развивается довольно интенсивно, и достигает дневной поверхности достаточно быстро. В таком случае, необходимость в оценке карстоопасности участка отпадает. Тем не менее, при определенных условиях, деформация покрывающей толщи может не достигать поверхности неопределенно долгое время. Такими условиями могут быть: относительно небольшой внутренний объем обрушившейся полости, заполнение полости обрушившимся материалом, низкий гидравлический градиент нисходящего потока подземных вод, небольшая мощность водонасыщенных дисперсных грунтов, наличие в песчаных грунтах глинистых прослоек, тормозящих развитие обрушения и т.д. При таких условиях, обнаружение разуплотненной зоны над обрушившейся карстовой полостью возможно по характерному падению показателей сопротивления грунта при статическом или динамическом зондировании.

Разупрочнение и разуплотнение. Смешанный тип ослабленной зоны может развиваться в покрывающей толще, представленной разнородными по своему литологическому составу грунтами. В случае, когда над карстующимися породами залегают несвязные грунты, а те в свою очередь перекрыты глинистыми породами, в покрывающей толще формируются разного рода аномалии. В нижележащей толще, при наличии суффозионных или карстово-обвальных процессов возможно разуплотнение грунта, которое может привести к деформациям вышележащей глинистой толщи. Однозначно, деформация глинистого слоя будет выражена в ее прогибе, и соответственно, в снижении прочности. Нередки случаи, когда под глинистой толщей, в песках, формируются полости обрушения, регистрируемые даже провалом бурового инструмента [55].

В остальных случаях, подобный тип ослабленной зоны можно обнаружить по данным статического или динамического зондирования.

В условиях покрытого карста, оценить состояние карстующихся пород довольно сложно. Теоретически, это можно выполнить с помощью геологических и геофизических методов. Ещё сложнее определить местоположение возможного провала. Тем не менее, вероятность прогноза будущего карстового провалообразования довольно велика. Принцип прогнозирования заключается в способности покрывающей толщи накапливать информацию об условиях своего формирования и чутко реагировать на внешние факторы. Одним из таких факторов может являться формирование карстовой полости в нижележащих карстующихся породах. Информация, которую несет в себе покрывающая толща, выражается в особом распределении полей напряжений. В свою очередь, напряжения в грунте могут быть косвенно выражены с помощью его физико-механических свойств, характеризующих плотность или прочность грунта. Распределение этих параметров в массиве грунта довольно четко регистрируется с помощью динамического или статического зондирования.

2.4.3. Подтверждение феномена экспериментальными данными

Целью эксперимента являлось подтверждение феномена, охарактеризованного в подразделах 2.4.1 и 2.4.2: над карстовыми полостями, ещё до начала провалообразования, формируются так называемые «ослабленные зоны» [52]. Образование таких зон объясняется изменением напряженного состояния грунта, регистрируемого с помощью статического или динамического зондирования. Для проведения эксперимента была использована установка конструкции В.П. Хоменко, Е.П. Маханько, Е.И. Исаева и др. [77]. В данной конфигурации (рисунок 2.25) она представляла собой рабочую камеру размером 32×20×17 см, заполняемую материалом модели, имитирующим покрывающую толщу. Дно камеры оборудовано двойными раздвижными створками, создающими щель необходимой ширины. В щель помещался прямоугольный брусок шириной 3,6 см, выпадение которого имитирует выход карстовой полости на контакт с подошвой покрывающей толщи. Раздвижные створки отделяют рабочую камеру от нижней, являющейся потенциальной полостью-приемником для материала модели в случае его обрушения.

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. При этом не допускалось обрушение материала модели в полость-приемник. Микрозонд (рисунок 2.25) 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 молота (3 см), фиксировалась ограничителями. При проведении динамического микрозондирования подсчитывалось количество ударов молота, требуемое для погружения конуса зонда на каждые 2,5 см залога. Микрозонд не обладал большой энергией удара, что являлось его техническим преимуществом, поскольку благодаря этому обстоятельству он имел высокую чувствительность к малейшим изменениям прочности грунта.

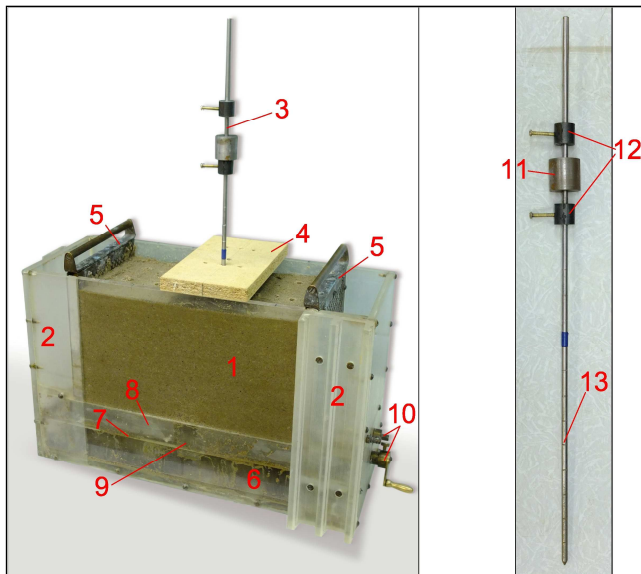


Рисунок 2.25. Экспериментальное оборудование

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

Проведение эксперимента. Эксперимент начинался с укладки в рабочую камеру материала модели, в роли которого выступал песок средней крупности, однородный, влажный (таблица 2.4). Укладка песка производилась послойно, с уплотнением каждого слоя.

Таблица 2.4. Свойства грунта, использовавшегося в качестве материала модели

Плотность грунта (ρ), г/см ³	1,90
Плотность частиц грунта (ρ_s), г/см ³	2,65
Плотность скелета грунта (ρ_d), г/см ³	1,63
Влажность природная (W), %	16,4
Степень влажности грунта (S_r)	0,70
Коэффициент пористости (e)	0,62

Первым этапом эксперимента являлось выполнение микрозондирования в пяти точках (точки №№ 1-5), расположенных в один ряд (рисунок 2.26) вдоль задней стенки рабочей камеры, с некоторым отступом от неё. Отступ необходим для минимизации влияния стенки на параметры зондирования. Испытание имело целью получение исходной картины распределения

показателя зондирования в вертикальной плоскости. Количественно этот параметр выражается через число ударов, затрачиваемых на погружение микрозонда на глубину залого в 2,5 см.

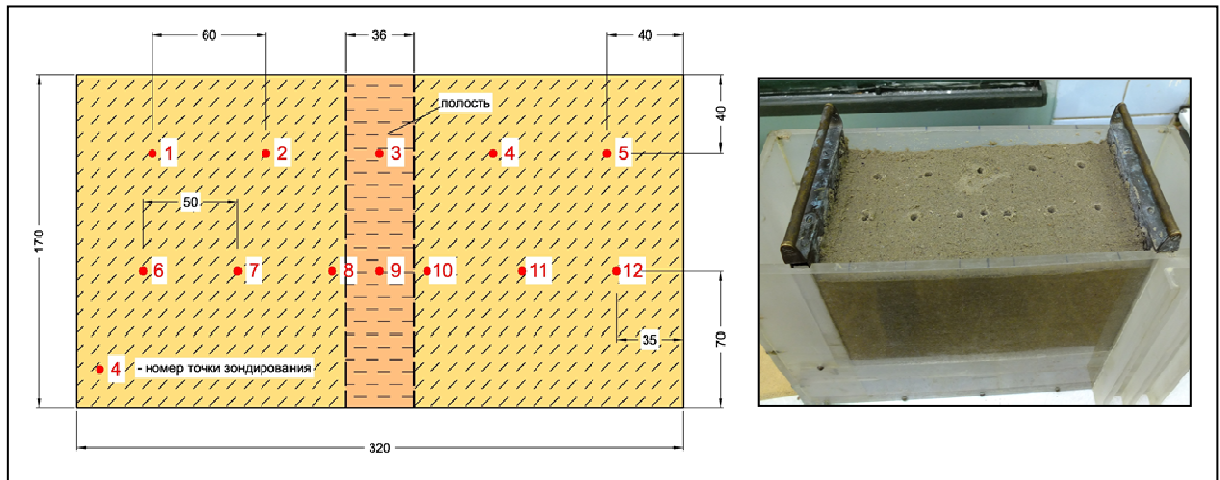


Рисунок 2.26. Схема расположения точек микрозондирования (вид сверху). Зондирование в точках №№ 1-5 выполнено до образования щели в дне рабочей камеры, а в точках №№ 6-12 – после этого события (размеры даны в мм)

После обработки полученных данных были построены графики зондирования и вертикальный разрез по 5-ти точкам, отражающий картину распределения показателя зондирования до появления щели в дне рабочей камеры. Зондирование показало во всех точках практически линейное увеличение количества ударов с глубиной, от 20-30 до 130-150 (рисунок 2.27).

На втором этапе имитировался выход карстовой полости на контакт с подошвой покрывающей толщи. Для этого с помощью специального устройства (позиция 10 на рисунке 2.25) вращением рукоятки раздвигаются нижние створки, до тех пор, пока брусок, закрывающий щель в дне рабочей камеры не упадет в нижнюю камеру. При этом вывала материала модели в нижнюю камеру установки не происходит (рисунок 2.28). Таким образом, достигалось планируемое условие, при котором кровля карстовой полости вышла на контакт с подошвой покрывающей толщи, но обрушения слагающего ее грунта ещё не произошло. Для перераспределения напряжений в грунтовой толще необходимо некоторое количество времени. В данном эксперименте, учитывая размеры и материал модели, было решено подождать 30 минут до начала второго цикла зондирования.

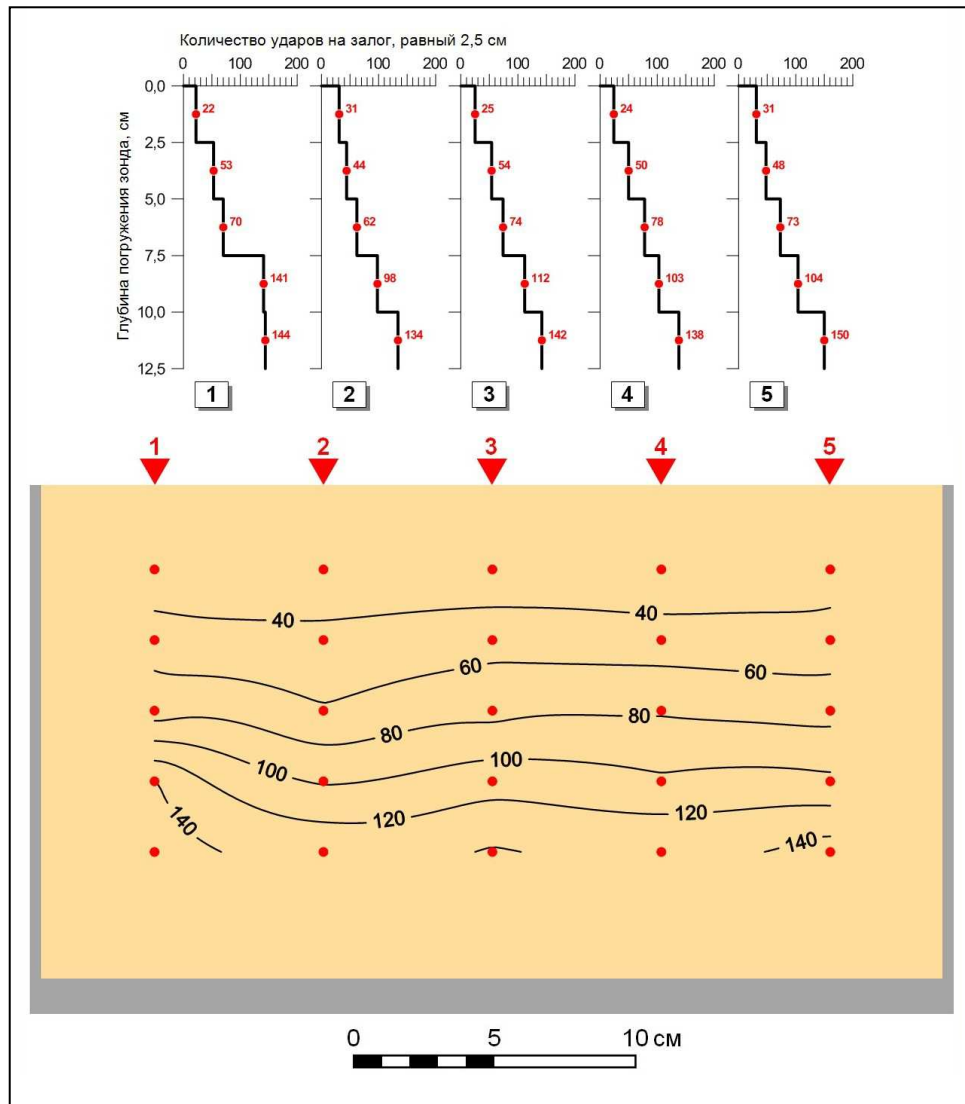


Рисунок 2.27. Пространственное распределение показателя динамического микрозондирования (количества ударов, затрачиваемое на погружение зонда на 2,5 см) в материале модели до появления щели в дне рабочей камеры (1-й этап эксперимента). В верхней части рисунка показаны графики зондирования, в нижней – изолинии показателя зондирования

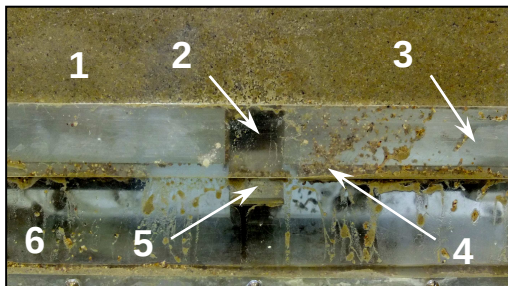


Рисунок 2.28. Имитация выхода карстовой полости на контакт с подошвой покрывающей толщи без обрушения слагающих ее пород

1 – рабочая камера, заполненная материалом модели; 2 – щель в дне рабочей камеры; 3 – верхняя створка; 4 – нижняя створка; 5 – выпадающий брусок; 6 – нижняя камера

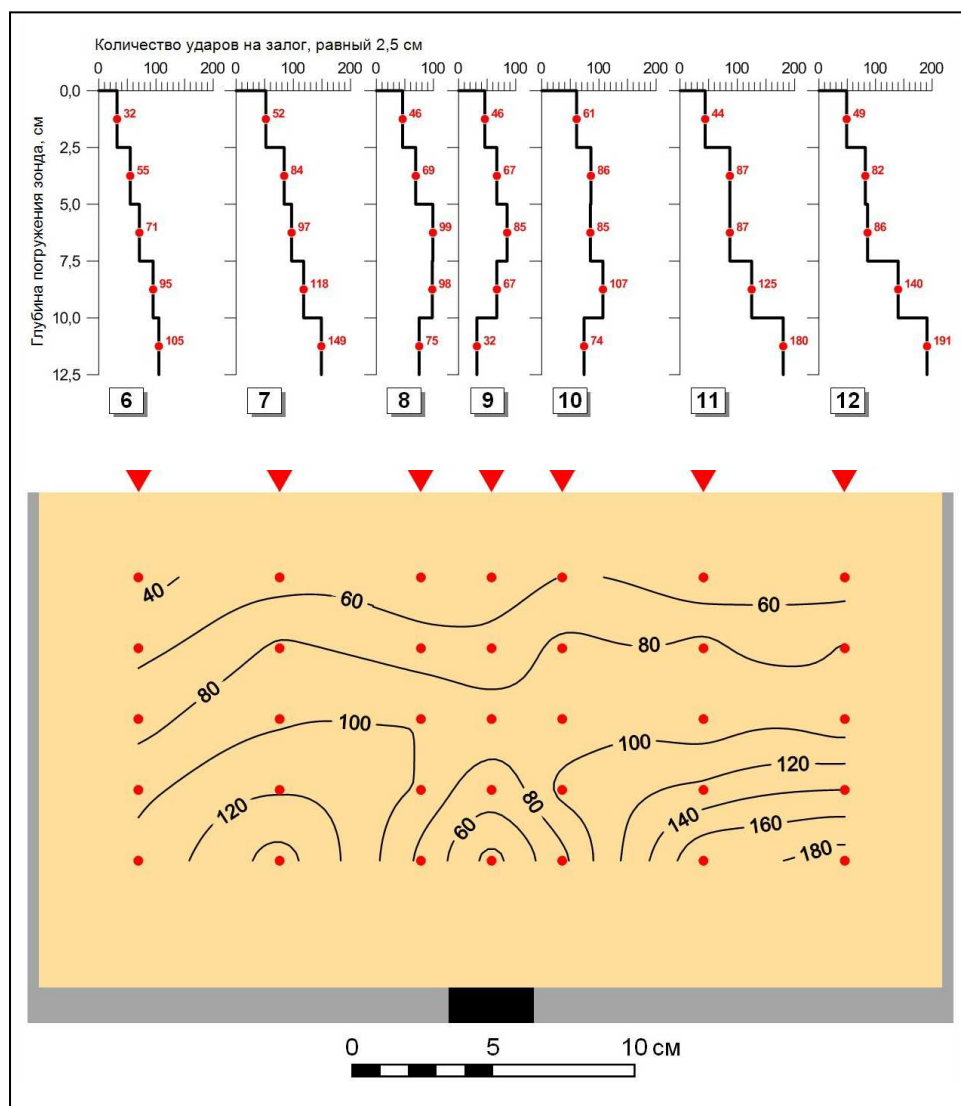
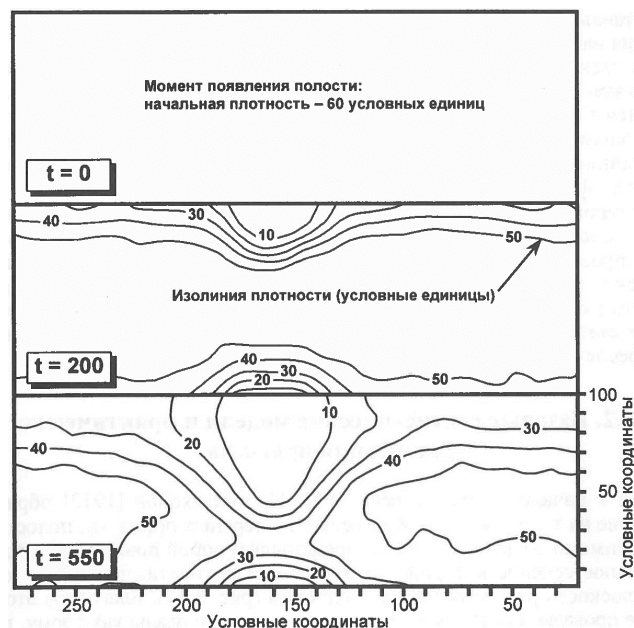


Рисунок 2.29. Пространственное распределение показателя динамического микрозондирования в материале модели после появления щели в дне рабочей камеры (2-й этап эксперимента). См. примечания к рисунку 2.27

Следующий ряд зондирования, на котором было расположено 7 точек (точки №№ 6-12) располагался ближе к осевой линии рабочей камеры (рисунок 2.26). По полученным данным также были построены графики зондирования и вертикальный разрез по точкам испытания (рисунок 2.29). Второй цикл испытаний грунта зондированием выявил «ослабленную» зону грунта над образовавшейся полостью, которая четко зафиксирована по картине снижения количества ударов на залог. При этом «полка» подошвы песков оставалась в сохранности и не обваливалась в нижнюю камеру. «Ослабленная» зона характеризуется количеством ударов от 40 до 80, в то время как фоновые значения на этой глубине составляют 120-160 ударов молота на залог.

Рисунок 2.30. Результаты имитационного моделирования на основе клеточного автомата [81]: распределение плотности дисперсных пород над полостью (в вертикальной плоскости) в различные моменты времени (t), выраженные в условных единицах



Картина изолиний на рисунке 2.29 практически идентична картине, полученной Е.Н. Коломенским [81] в ходе компьютерного моделирования влияния полости на состояние перекрывающих ее дисперсных пород (рисунок 2.30). Это дополнительно подтверждает гипотезу о закономерном изменении напряженного состояния пород покрывающей толщи над расположенной под ее подошвой незакольтмированной полостью в карстующихся породах, которое отчетливо фиксируется при их статическом или динамическом зондировании [77]. Таким образом, с помощью специального анализа результатов, полученных этими полевыми методами, можно определить некоторую ограниченную область на земной поверхности, в пределах которой появится будущий карстовый провал.

Результаты опытов свидетельствуют 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 натурального эксперимента было проведено исследование провала грунта, образовавшегося при прокладке подземного коллектора методом микротоннелирования [45], и при этом были получены аналогичные результаты. Важно, что метод обнаружения и локализации ослабленных зон для искусственных и естественных условий одинаков – статическое или динамическое зондирование.

2.5. Выводы

1. В районах покрытого карста образуются карстовые провалы пяти типов, различающиеся по механизму их формирования: карстово-обвальные провалы «простого» и «сложного» ти-

пов, карстово-суффозионно-обвальные провалы и карстово-суффозионные провалы фреатического и вадозного типов. О потенциальной возможности появления этих провалов на земной поверхности, свидетельствует ряд признаков, выражающихся в особенностях строения покрывающей толщи, к которым в частности относятся: а) погребенные карстовые оседания и провалы; б) зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород; в) зоны разупрочнения пород покрывающей толщи над полостями.

2. Погребенные карстовые оседания и провалы представляют собой особые структурные элементы покрывающей толщи, которые проявляются в специфической конфигурации ее подошвы и поверхностей контакта между слагающими ее слоями дисперсных пород. Наличие таких структур свидетельствует о возможности новых нисходящих вертикальных подвижек покрывающих пород, вплоть до выхода их на земную поверхность в виде провала, а также о возможности существования сквозных нарушений сплошности водоупора, перекрывающего карстующиеся породы, при его присутствии в геологическом разрезе.

3. В нижних слоях покрывающей толщи, сложенных несвязными породами, могут присутствовать эллипсовидные в плане зоны, внутри которых от периферии к центру наблюдается снижение процентного содержания мелких фракций или степени неоднородности гранулометрического состава этих 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), и является признаком подготовки карстово-суффозионного провалообразования.

4. Появление незакольтатированной карстовой полости вызывает закономерное изменение напряженного состояния перекрывающих ее дисперсных пород не только в ее кровле, но и вблизи земной поверхности, что легко улавливается с помощью статического или динамического зондирования. Присутствие в покрывающей толще таких вертикально осесимметричных зон разупрочнения является признаком подготовки обрушения покрывающих пород с выходом на поверхность в виде провала. Кроме того, статическое или динамическое зондирование позволяет обнаруживать в покрывающей толще так называемые ослабленные зоны, имеющие другое происхождение, причем некоторые из них также являются признаками подготовки карстового провалообразования.

3. Поиск и идентификация признаков подготовки карстового провалообразования

3.1. Основные принципы

В разделе 2 было показано, что признаки подготовки карстового провалообразования, несмотря на их разную природу, представляют собой локальные аномалии в пространственном распределении некоторых численно выражаемых параметров, которые представляют собой данные, получаемые в результате буровых работ, определения гранулометрического состава грунтов, отобранных из скважин, и статического или динамического зондирования грунтов. Следовательно, эти параметры привязаны к скважинам и точкам статического или динамического зондирования, определенным образом расположенным на земной поверхности, то есть имеющим численно выраженные абсциссу (X) и ординату (Y) в некоторой прямоугольной системе координат на горизонтальной плоскости.

Добавляя к этим координатам аппликату (Z), отвечающую количественно выраженному параметру, характеризующему искомый признак, получаем систему прямоугольных координат в пространстве и с помощью интерполяции строим трехмерную поверхность пространственного распределения интересующего нас параметра. Дальнейшие действия представляют собой изучение такой поверхности с целью выделения на ней достаточно ярко выраженных замкнутых депрессий (рисунок 3.1), поскольку для выявления любого из трех признаков подготовки карстового провалообразования интерес представляет локальное уменьшение величины параметра, характеризующего этот признак, по сравнению с некоторым «фоном».

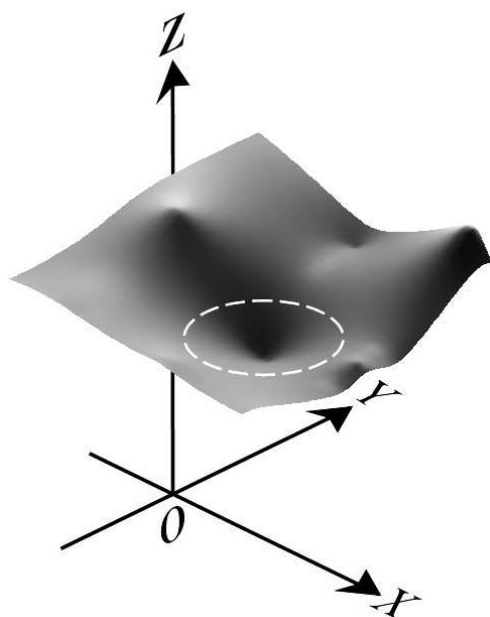


Рисунок 3.1. Схема, иллюстрирующая основной принцип поиска признака подготовки карстового провалообразования: выявление замкнутой депрессии на трехмерной поверхности, построенной с помощью интерполяции дискретных значений параметра, характеризующего искомый признак (X , Y – прямоугольные координаты на горизонтальной плоскости; Z – величина параметра)

При поиске погребенных карстовых оседаний и провалов изучаются сглаженные, но реальные поверхности литолого-стратиграфических границ между слоями пород покрывающей толщи, выступающие в роли маркирующих поверхностей, причем их должно быть не меньше двух. Аномалия идентифицируется как искомый признак только при совпадении в плане центров депрессий, выявленных на всех маркирующих поверхностях. В ходе поиска зон суффозионного выноса мелких частиц несвязных пород в карстовые трещины или полости и зон разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями изучаются виртуальные поверхности, графически изображающие поля пространственного распределения параметра, характеризующего искомый признак. При этом в первом случае показатель, характеризующий признак подготовки карстового провалообразования, определяется дискретно по одной или нескольким пробам, отобранным из одного инженерно-геологического элемента в одной скважине, а во втором – непрерывно по всей глубине статического или динамического зондирования. Это означает, что для точки с координатами X и Y величина Z в первом случае иногда, а во втором всегда должна рассчитываться в соответствии с некоторым принципом осреднения.

Следует также отметить, что в ходе инженерно-геологических изысканий могут быть обнаружены феномены, которые дополнительно способствуют корректной идентификации признаков подготовки карстового провалообразования (таблица 3.1). В целом же, подход к учету всех вышеперечисленных обстоятельств при поиске и идентификации искомых признаков целесообразно продемонстрировать на конкретных примерах.

Таблица 3.1. 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 3.1)	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 granulometric composition	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

3.2. Поиск погребенных карстовых оседаний и провалов

3.2.1. *Некоторые общие положения*

Как уже отмечалось в подразделе 2.2.1, поиск погребенных карстовых оседаний и провалов осуществляется с помощью палегеоморфологического анализа, цель которого состоит в обнаружении характерных замкнутых депрессий на маркирующих поверхностях, которые представляют собой геолого-литологические границы между слоями покрывающих пород, включая подошву покрывающей толщи. Для этого необходимо получить информацию о геологическом строении исследуемой территории с помощью буровых работ (которые могут сопровождаться статическим или динамическим зондированием грунтов) и геофизических исследований.

Как источник информации для поиска погребенных карстовых оседаний и провалов, бурение обладает объективными достоинствами и недостатками: с одной стороны, оно позволяет однозначно определять высотное положение маркирующих поверхностей в точке, где расположена скважина, с другой – предусмотренные нормами большие расстояния между этими точками не дают возможности четкого определения границ искомого объекта. С геофизическими данными связана другая проблема: их континуальность (а точнее, очень высокая дискретность) позволяет намного лучше решать вторую задачу, но трудности их однозначной геологической интерпретации создают серьезные проблемы в определении границ между слоями однотипных горных пород.

Таким образом, для успешного поиска и идентификации погребенных карстовых оседаний и провалов представляется целесообразным комплексное использование буровых работ и геофизических исследований, как наземных, так и скважинных, что, в общем-то, и предусматривается требованиями нормативных документов к составу инженерно-геологических изысканий, выполняемых в районах развития карста [15, 16]. Кроме того, геофизические исследования приобретают особый смысл при изысканиях на крупных площадках и при относительно глубоком залегании карстующихся пород. В таких условиях геофизические методы позволяют значительно сократить затраты на получение необходимой геологической информации, так как снижают объемы глубокого бурения.

В качестве примера комплексного использования результатов буровых работ и геофизических исследований для поиска погребенных поверхностных карстопроявлений рассматривается палеогеоморфологический анализ, выполненный диссертантом на участке, расположенном в Республике Башкортостан, на южной окраине г. Уфы, в Кировском районе, к западу от трассы Уфа-Оренбург. Размеры участка составляют примерно 450×950 м. Инженерно-геологические

изыскания, результаты которых были использованы для анализа, выполнялись на участке в течение 2003-2004 гг. экспедицией ЗАО «ЗапУралТИСИЗ» [109].

3.2.2. Краткая геологическая характеристика исследуемой территории

Тектоника. Уфа расположена на восточной окраине Русской платформы (рисунок 3.2), примерно в 50 км западнее Предуральяского прогиба. В 30-40 км на северо-запад от Уфы находится Бирская седловина, соединяющая Татарский и Башкирский своды, а на юго-востоке Уфа практически граничит с Рязано-Охлебинским валом (рисунок 3.3). Расположение города в окраинной части платформы, вблизи Уральской складчатой области отражается на геологическом строении территории. Помимо крупных структур первого порядка здесь выделяются и более мелкие валы, поднятия, синклинали и т.д. Границы мелких структур могут прослеживаться в отложениях девона, карбона, а также нижней и верхней перми. Это выражается в складчатом характере залегания пермских сульфатных слоев и наличии в них ослабленных, трещиноватых и разрушенных участков, что благоприятствует развитию карста.

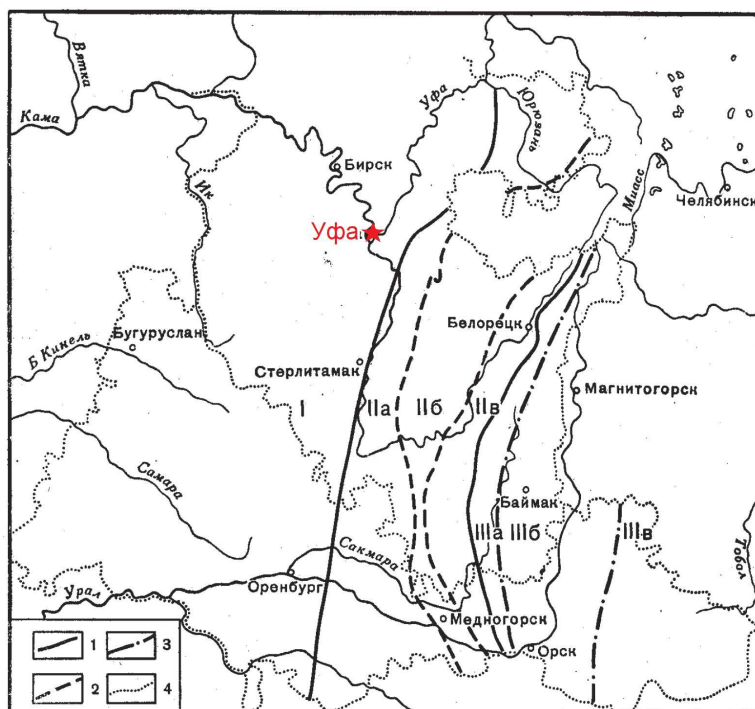


Рисунок 3.2. Схема геотектонического районирования Башкортостана и прилегающих областей (по Д.Г. Ожиганову [64, 65]). I - область восточной окраины Русской платформы; II - область промежуточная (западный склон Южного Урала и Предуральский прогиб): IIa - Западная зона, Предуральский прогиб; IIб - Центральная зона, регион развития древних свит; IIв - Восточная, Приурал-Тауская зона; III - область восточного склона (до верхнего карбона геосинклинальная): IIIa - зона Урал-Тау; IIIб - Магнитогорская зона; IIIв - зона Урало-Тобольского водораздела. 1- граница тектонических областей; 2 - границы зон, выделяемых во II области; 3 - граница зон, выделяемых в III области; 4 - границы Башкортостана и соседних областей

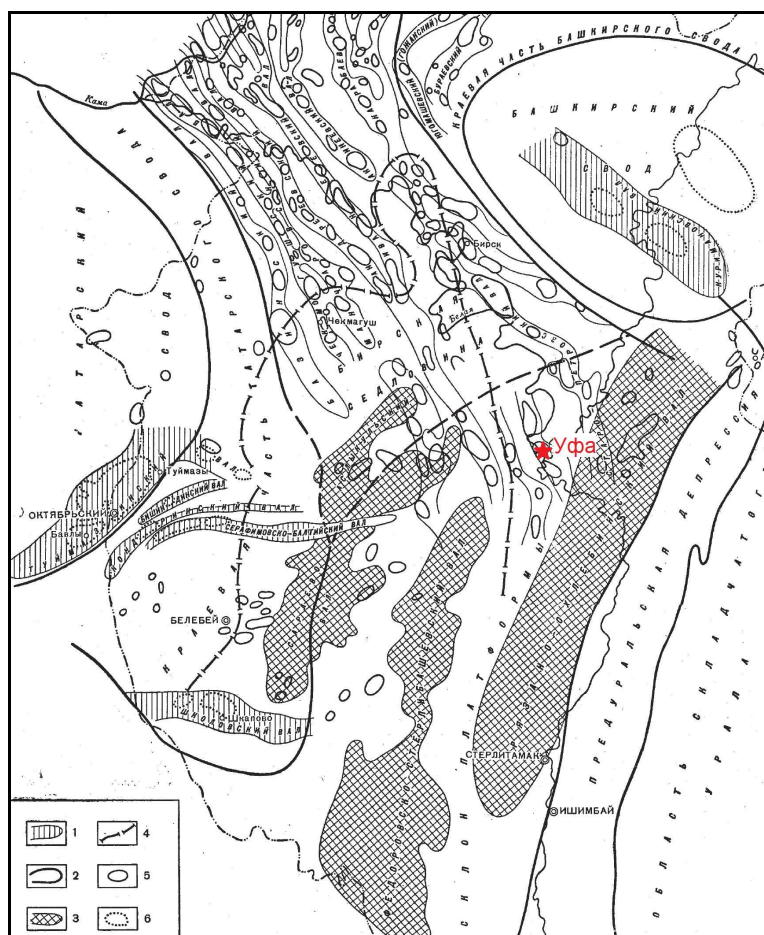


Рисунок 3.3. Тектоническая схема Башкирского Приуралья [31]. 1 – валы, установленные по девонским отложениям; 2 – валы, установленные по каменноугольным и сакмаро-артинским отложениям; 3 – валы, прослеживаемые по верхнепермским и кунгурским отложениям; 4 – граница распространения соли в отложениях кунгурского яруса; 5 – контуры нижнепермских поднятий; 6 – контуры девонских поднятий

Геоморфология. Исследуемый участок находится на левом берегу реки Белая, в пределах ее высокой поймы. Рельеф относительно ровный, характеризуется абсолютными отметками 86-97 м. Периодически пойма реки затопливается паводковыми водами. Юго-восточная часть участка осложнена замкнутыми понижениями земной поверхности, идентифицируемыми как карстово-суффозионные провалы (рисунок 3.4), которые лучше именовать воронками, поскольку они не являются свежими проявлениями. Понижения размером в плане 20×20 м и 40×40 м и глубиной до 2,5 м четко выражены в рельефе, имеют округлые чашеобразные и блюдцеобразные формы. Дно понижений заболочено. Воронки расположены рядом друг с другом и практически сливаются в одну (№ I на схеме), вытянутую в субмеридианальном направлении. Южнее, находится ещё одна воронка (№ II на схеме) размером 30×30 м и глубиной до 2,0 м, которая соединяется с первым узким перешейком. В период проведения инженерных изысканий, эти воронки были засыпаны гравийным грунтом, после чего, через некоторое время, по периметру засыпанных воронок образовались трещины усадки шириной до 5-12 см и 1,0-1,5 м глубиной.

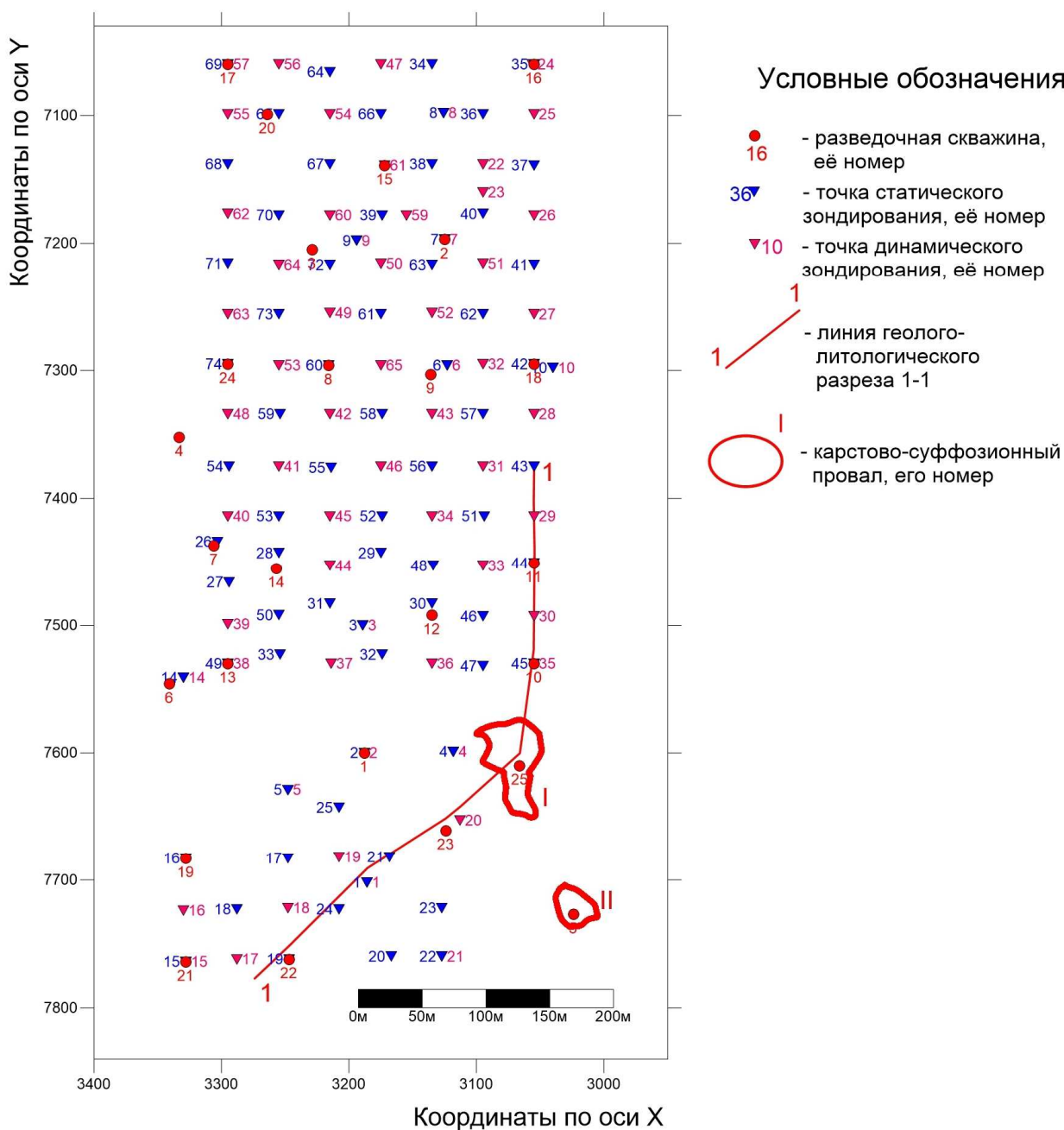


Рисунок 3.4. Схема расположения на исследуемом участке разведочных скважин, точек зондирования и поверхностных карстопроявлений

Геологическое строение участка (рисунок 3.5) исследовано бурением до глубины 63,0 м. В строении принимают участие породы четвертичного, неогенового и пермского возрастов.

Четвертичная система (Q) представлена аллювиальными отложениями среднего (aQ_{II}) и верхнего (aQ_{III}) отделов. Верхний отдел (aQ_{III}) сложен:

1. Глинами полутвердой и мягкопластичной консистенции, с примесью органики, с прослойками и линзами песка. Глины распространены повсеместно, их мощность составляет 0,8-3,7 м.

2. Суглинками тугопластичными и мягкопластичными, с линзами и прослойками песка. Суглинки залегают практически повсеместно, их мощность изменяется от 0,8 до 6,2 м.

3. Песками средней крупности, влажными и водонасыщенными, средней плотности и рыхлыми, мощностью 1,5-6,3 м. Пески распространены на всей изучаемой территории.

Средний отдел (аQII) представлен:

4. Гравийными грунтами, насыщенными водой, плотными и рыхлыми, с заполнителем из мелкого песка, местами с прослоями глин мощностью до 0,5-1,0 м. Залегают гравийные грунты повсеместно. Мощность слоя варьирует от 7,2 до 32,0 м.

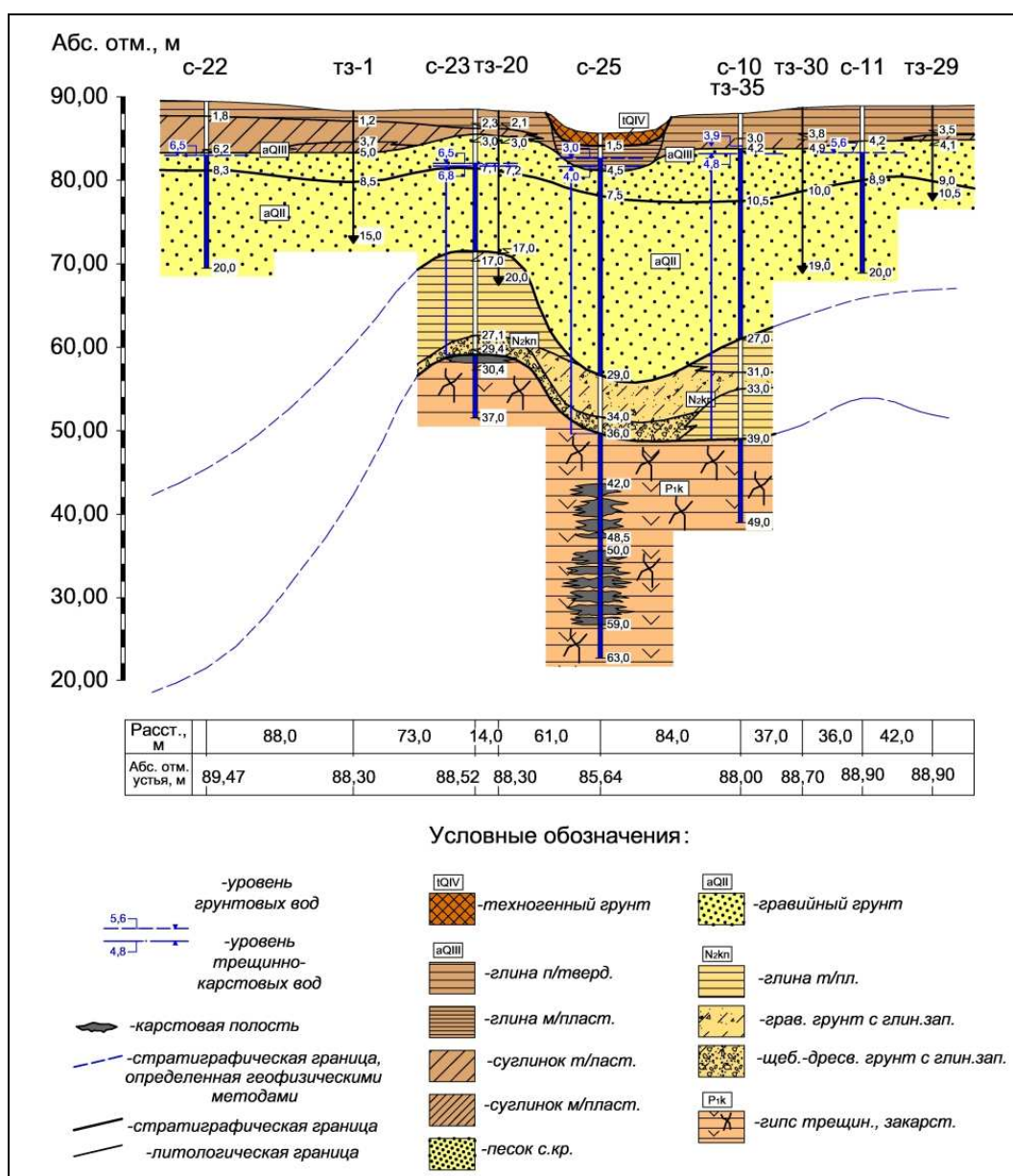


Рисунок 3.5. Геолого-литологический разрез по линии 1-1 (см. рисунок 3.4)

Неогеновая система (N) представлена континентальными (речными и озерными) отложениями кинельской (N_{2kp}) свиты плиоцена:

5. Глинами тугопластичными, участками с включениями щебня и дресвы до 15%. Глины имеют максимальную мощность 7,5-20,0 м, распространены не повсеместно. Местами, в частности в районе карстово-суффозионных воронок, они отсутствуют, образуя «гидрогеологические окна» для водоносных горизонтов грунтовых и трещинно-карстовых вод. На этих участках глины либо выклиниваются, либо литологически замещаются гравийным грунтом с глинистым заполнителем. Качество и наличие водоупора в пределах площадки изысканий определялось по данным бурения, а также по значениям УЭС (удельного электрического сопротивления) и значениям естественной гамма-активности в скважинах.

6. Гравийным грунтом, насыщенным водой, с глинистым заполнителем до 35-40%. Состав гравийных отложений карбонатный (50-60%) и кварц-кремнистый (40-50%), мощность от 2,0 до 12,5 м. Распространение локальное.

7. Щебенисто-дресвяным грунтом карбонатного состава, с глинистым заполнителем до 35-40%. Прослой щебенистого грунта имеют локальное распространение, их мощность достигает 1,6-35,0 м.

8. Переслаиванием глин текучих и мягкопластичных с щебенисто-дресвяным грунтом, вскрытым одной скважиной (№ 6) в западной части участка. Возраст отложений определен как неоген-соликамский ($N_2 - P_{2sl}$), мощность слоя составляет 14,3 м.

Пермская система (P) представлена соликамским горизонтом (P_{2sl}) уфимского яруса (P_{2u}) верхнего отдела и кунгурским ярусом (P_{1k}) нижнего отдела.

Соликамский горизонт (P_{2sl}) представлен:

9. Глиной полутвердой, мергелистой, с включениями щебня и дресвы мергеля. Залегают слои в виде отдельных, неразмытых останцев мощностью до 2,7 м.

Кунгурский ярус (P_{1k}) сложен:

10. Гипсом крупнокристаллическим, брекчиевидным, в верхней части слоя - сильно трещиноватым, сильно закарстованным, в нижней – не затронутым карстом, с прослоями глин до 1,0 м. Отложения кунгурского яруса залегают повсеместно, их вскрытая скважинами мощность составляет 1,6-13,5 м. Кровля гипса, согласно данным бурения и геофизическим исследованиям, залегает на глубинах от 30 до 60 м. Максимальные глубины (до 50-60 м) зафиксированы в крайних южной и северной частях участка. В центральной части глубина их залегания составляет 30-40 м от поверхности земли.

Отдельными скважинами в верхней части гипсовой толщи были вскрыты заполненные карстовые полости:

скважиной № 1 в интервале глубин 39,0-40,8 м вскрыта полость, заполненная обломками гипса до 25-30%, глиной, щебнем и дресвой известняка;

скважиной № 23 в интервале глубин 29,4-30,4 м вскрыта полость, заполненная обломками гипса до 25-30%, глиной, щебнем и дресвой известняка;

скважиной № 6 в интервале глубин 57,0-58,0 м вскрыта полость, заполненная глиной;

скважиной № 10 в интервалах глубин 40,5-41,5 м и 44,0-45,0 м вскрыты полости, заполненные глиной;

скважиной № 25 – в интервалах глубин 42,0-48,5 и 50,0-59,0 м вскрыты многоярусные полости, заполненные гравием, обломками гипса, щебнем известняка с глинистым заполнителем.

Гидрогеологические условия. На площадке выделяются два водоносных горизонта. Первый горизонт грунтовых вод распространен в четвертичных аллювиальных песчаных отложениях. Второй водоносный горизонт межпластовых трещинно-карстовых вод приурочен к кунгурским гипсам.

Таблица 3.2. Водопроницаемость покрывающих и карстующихся пород

Горные породы и их возраст	Коэффициент фильтрации, м/сут
(аQ _{III}) Глины	0,2
(аQ _{III}) Суглинки	0,6
(аQ _{III}) Пески	4,2-16,7
(аQ _{II}) Гравийно-галечниковые грунты	37-115
(Р ₁ k) Гипс закарстованный	0,07-102,5 (по данным откачек)

Первый водоносный горизонт залегает на глубинах 2,2-7,0 м (абсолютные отметки 80,2-85,1 м) от дневной поверхности. Он приурочен к песчаным и гравийным аллювиальным грунтам четвертичного возраста. Горизонт безнапорный, его мощность изменяется от 9,0 до 25,0 м. Питание происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, притока со стороны более высоких речных террас, за счет подпитки водами реки Белой и притока трещинно-карстовых вод через «гидрогеологические окна». Последнее подтверждается результатами химического анализа. По химическому составу воды первого горизонта гидрокарбонатно-сульфатные, кальциево-магниевые и сульфатно-гидрокарбонатные, кальциево-магниевые-натриевые. Минерализация 0,2-1,0 г/л, содержание сульфатов – 330-376 мг/л.

Второй водоносный горизонт распространен в верхней зоне кунгурских отложений, представленных трещиноватыми и закарстованными гипсами. Горизонт вскрыт на глубинах 29,4-40,2 м (абсолютные отметки 47,9-59,1 м) от поверхности земли. Установившиеся уровни зафиксированы на глубинах 4,0-8,0 м (79,9-84,9 м). Воды второго горизонта напорные, величина

напора составляет 22,6-34,2 м. Питание горизонта осуществляется за счет притока воды со стороны водораздела, более высоких террас, подпитки из вышележащего аллювиального горизонта грунтовых вод через «гидрогеологические окна» и за счет притока воды реки Белой. По химическому составу воды сульфатные, кальциевые и сульфатно-гидрокарбонатные, кальциевые. Их минерализация составляет 2,5-2,7 г/л, содержание сульфатов – 1634 мг/л, а гипсовая емкость – 196,0-439,6 мг/л (слабоагрессивная среда к сульфатам).

По данным гидрогеологических наблюдений прослеживается четкая взаимосвязь между уровнями первого и второго водоносных горизонтов и колебаниями уровня поверхностных вод реки Белая, что говорит об их тесной гидравлической связи. Фильтрационные свойства пород, определенные в лабораторных и полевых условиях, представлены в таблице 3.2.

Условия развития карста. Геологическое строение исследуемой территории характеризуется распространением нижнепермских гипсов, верхняя толща которых является сильно трещиноватой и закарстованной (бурением вскрыты полости высотой до 1,0-2,0 м). Кровля кунгурских отложений неровная (глубина залегания изменяется от 30 до 60 м), характеризуется локальными понижениями и поднятиями, что, вероятно, является следствием тектонических движений в этом регионе, осложненных, впоследствии, экзогенными процессами формирования рельефа. Большая часть гипсов перекрыта водоупорным слоем – неогеновыми глинами, различной мощности (от 7,5 до 20,0 м). Однако в юго-восточной части исследуемой территории, в районе скважины № 25 глинистый водоупор отсутствует полностью (рисунок 3.5). В этом месте карстующиеся породы отделены от вышележащих четвертичных дисперсных грунтов толщей гравийно-галечникового и щебенистого грунта с глинистым заполнителем, мощностью до 7 м. Считать эту толщу надежным водоупором нельзя по причине её довольно высокой водопроницаемости и низких прочностных свойств слагающих ее пород.

С точки зрения инженерного карстоведения важным обстоятельством является также наличие двух водоносных горизонтов, первый из которых безнапорный, поровый, второй напорный, трещинно-карстовый. Ввиду того, что оба горизонта имеют сложную гидравлическую связь, как между собой, так и с поверхностными водами реки Белой, для них характерны сезонные колебания уровней, амплитудой до 5,0 м и более. Такие колебания уровней грунтовых и подземных вод могут спровоцировать начало карстово-обвальных или карстово-суффозионных процессов. Особенно, этим процессам подвержены участки с малой мощностью водоупора или зоны, где он отсутствует, к примеру, юго-восточная часть площадки, в районе скважины № 25. При таких геологических условиях, вероятнее всего возникновение провала карстово-суффозионного или карстово-суффозионно-обвального типа. В этой части участка деформации покрывающей толщи достигли дневной поверхности – воронки можно наблюдать

визуально, что априори снимает вопросы об активности процессов карстового провалообразования.

3.2.3. Анализ данных разведочного бурения

В районе скважины № 25 деформация грунта прослеживается не только на поверхности, но и в нижележащих слоях. Наиболее четко, провал фиксируется в верхней части разреза, по границе подошвы аллювиальных глин и кровли песков средней крупности, в виде характерного понижения. Амплитуда понижения, относительно соседних абсолютных отметок подошвы глин (скв. №№ 10 и 23), составляет 2,6-4,3 м. Причем, деформация отразилась также на состоянии и свойствах глин: коэффициент пористости (e) увеличился с 0,9 до 1,2; плотность (ρ) уменьшилась с 1,85 до 1,65 г/см³, а консистенция изменилась от полутвердой до мягкопластичной. Снизились их прочностные характеристики – угол внутреннего трения (ϕ) с 20° до 13°, удельное сцепление (c) с 0,061 до 0,009 МПа.

В меньшей степени деформация выражена по границе верхнечетвертичных (aQ_{III}) песков средней крупности и среднечетвертичного (aQ_{II}) гравийного грунта. Это объясняется первоначальной полого-наклонной формой кровли среднечетвертичных отложений. Более точно, границы деформации можно было бы определить путем бурения дополнительных скважин, расположенных по более плотной сетке. Тем не менее, влияние карстового процесса на образование депрессии в кровле этого слоя исключать нельзя. Во-первых, её контуры совпадают с границами участка, где отсутствуют водоупорные неогеновые глины. Во-вторых, амплитуда понижения составляет более 3,0 м, что соответствует амплитуде понижения вышележащих горизонтов.

По поверхностям нижележащих неогеновых и нижнепермских отложений также прослеживается характерная депрессия. По отношению к отметкам кровли указанных слоев, в скважине № 23 перепад составил 12,0 и 6,4 м для неогена и перми соответственно, а в скважине № 10 разница в 2,0 м наблюдается только для кровли неогена, кровля пермских гипсов залегает примерно на одном уровне. В целом, рельеф поверхности неогена наследует рельеф нижнепермских отложений, что объясняется тектоническими особенностями региона. Следует также отметить, что верхняя часть кунгурских гипсов сильно трещиноватая и закарстованная, а скважиной № 25, пробуренной в центре воронки, в интервалах 42,0-48,5 м и 50,0-59,0 м вскрыты многоярусные карстовые полости. Полости заполнены желтовато-коричневым гравием (до 50%), предположительно аллювиального облика, обломками гипса (20-25%), щебнем и дресвой (20-25%) с глинистым заполнителем. Характер залегания пермских отложений говорит о том, что провал образовался на юго-восточном, пологом склоне купола, прослеживаемого по кровле гипсов (рисунок 3.6).

Исходя из вышеизложенного, можно сделать некоторые выводы касательно карстологической обстановки на исследуемом участке:

1. Деформации, вызванные процессами разрушения карстующихся пород, также отражаются в грунтах покрывающей толщи. Они прослеживаются по маркирующим горизонтам – литологическим границам, наследующим изменения рельефа поверхности карстующихся пород.

2. Точность определения контуров погребенных карстовых воронок, которые представляют собой оседания или провалы, зависит от количества источников геологической информации (скважин, точек зондирования, геофизических данных и т.д.).

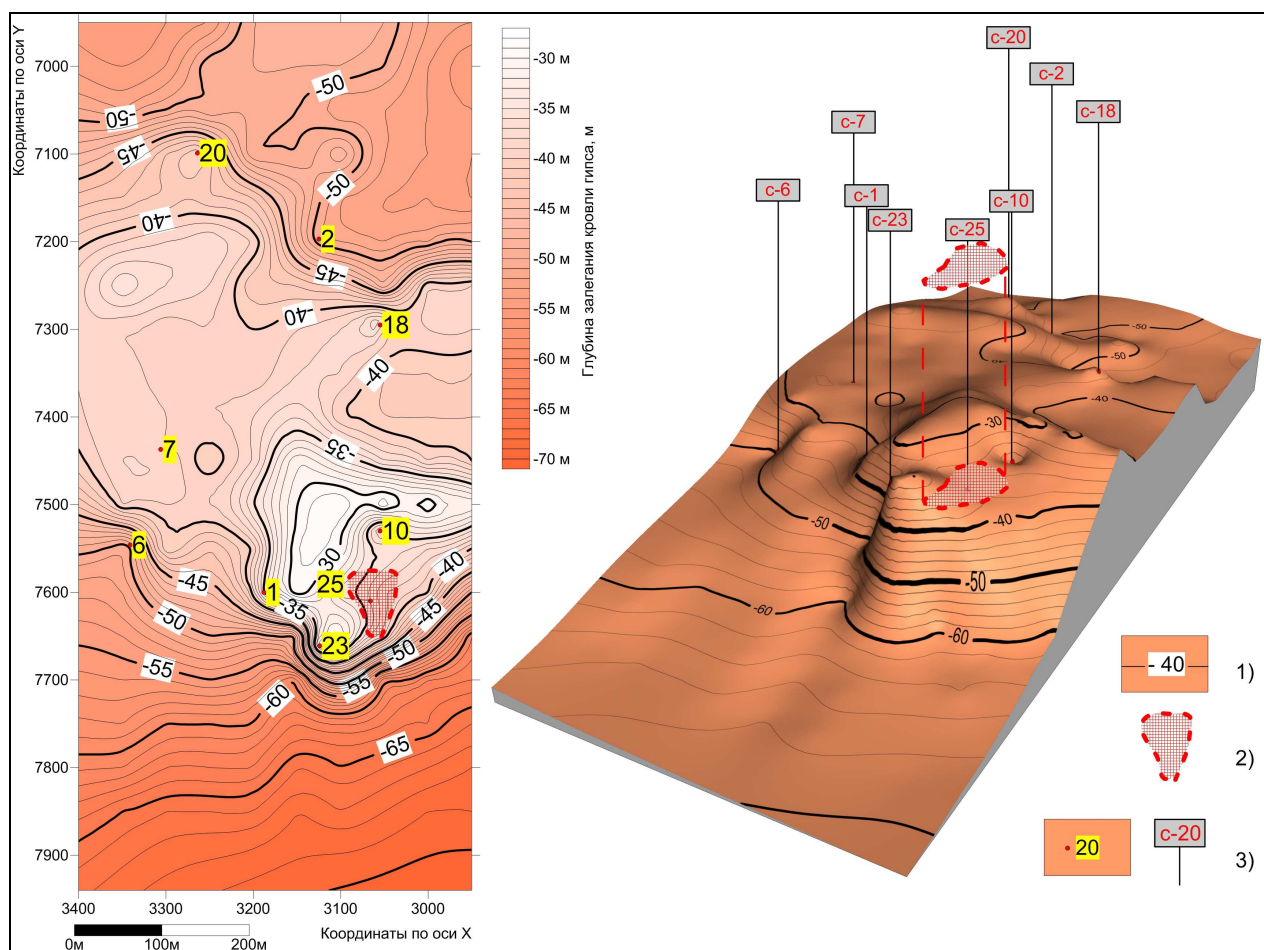


Рисунок 3.6. Карта поверхности кунгурских гипсов на исследуемом участке, построенная по геофизическим данным и материалам разведочного бурения

1) – изобаты залегания кровли гипсов; 2) – карстово-суффозионная воронка, присутствующая на земной поверхности и спроецированная на кровлю гипсов; 3) – разведочная скважина «на карст» и её номер

3. На первый взгляд, наиболее вероятная причина образования провала – суффозионный вынос дисперсного материала в трещины и полости пермских гипсов. На это указывают особенности геологического строения: наличие несвязного грунта в покрывающей толще, локальное отсутствие водоупора, полости и трещины в карстующихся породах. Однако ряд факторов

позволяет предположить, что провалообразование в этом месте протекало по более сложной схеме и скорее всего провал относится карстово-суффозионно-обвальному типу (рисунок 2.2).

К этим факторам относятся:

- характер рельефа поверхности кунгурских отложений;
- сильная трещиноватость и закарстованность гипсовой толщи, и как следствие её низкая прочность;
- наличие достаточно крупных, многоярусных карстовых полостей, вскрытых скважиной № 25;
- присутствие большого количества (до 50% заполнителя полостей) гравийного материала предположительно четвертичного возраста в карстовых пустотах.

3.2.4. Анализ геофизических данных

Согласно практике, сложившейся в Республике Башкортостан [13], на исследуемой площадке в составе инженерно-геологических изысканий, был выполнен комплекс наземных и скважинных геофизических исследований. Наземные геофизические работы включали в себя вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ, КВЭЗ). По полученным данным были намечены точки бурения разведочных скважин «на карст» и для поиска участков отсутствия водоупора. Во время буровых работ выполнялся каротаж скважин (ГК, ГГК) и исследования околоскважинного пространства методом заряда (МЗ). Целью геофизических исследований являлось:

- разделение разреза по геофизическим параметрам и геологическая интерпретация полученных данных;
- определение глубины залегания кровли карстующихся пород;
- определение глубины залегания, мощности и качества водоупорного слоя;
- обнаружение, выделение в плане и в разрезе закарстованных и сильнотрещиноватых участков.

Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) выполнялось по шести детализационным профилям. Общее количество точек ВЭЗ – 101. Они расположены по сетке 50×50 (25) м. Круговые ВЭЗ – четырехазимутальные (3 ф.н.), выполнены в 4 точках. Установка ВЭЗ симметричная, четырехэлектродная, длиной до 1000 м со стандартным набором разносов линий АВ и MN, ориентированных вдоль элементов рельефа. Аппаратура: АНЧ-3.

Качественная интерпретация графиков ВЭЗ заключалась в определении типов кривых и сравнении их с соседними точками. В результате было получено первое представление о геоэлектрическом разрезе: количество слоев, их мощность и значения удельного электрического сопротивления (УЭС) для каждого отдельного слоя. Данные бурения глубоких скважин «на

карст» позволили, с помощью компьютерной обработки в программе IPI GATE, провести количественную интерпретацию графиков ВЭЗ с определением мощностей (h) и удельных электрических сопротивлений (ρ) для всех геоэлектрических слоев (таблица 3.3). В результате, по полученным данным были построены геолого-геофизические разрезы и карта изобат (глубин залегания) кровли гипсов. Нужно отметить, что геофизические данные показали весьма удовлетворительную сходимость с данными, полученными инженерно-геологическими методами.

Каротажные исследования выполнялись в скважинах №№ 1, 2, 6, 7, 10, 18, 20, 23 и 25. Гамма-каротаж (ГК) выполнен для литологического расчленения разреза. Применяемый масштаб регистрации естественной радиоактивности (ГК) – 1:200. При исследованиях использовалась аппаратура «КУРА-1». Гамма-гамма-каротаж (ГГК) выполнен для определения плотности пород в разрезе. Измерения наведенной гамма-активности в методе ГГК точечные, через 0,5 м вдоль ствола скважины с детализацией через 0,25 м. Применяемая аппаратура – ППРГ-1.

Таблица 3.3. Значения геофизических параметров покрывающих и карстующихся пород, полученные разными методами

Наименование слоя	Удельное электрическое сопротивление (ρ), Ом·м	Естественное гамма-излучение (I), мкР/ч	Плотность (ρ) (по данным гамма-каротажа), г/см ³
(aQ _{III}) Глина полутвердая	8-55	5-10,5	1,75-1,9
(aQ _{III}) Суглинок полутвердый	65-85	6,5-13	–
(aQ _{III}) Песок средней крупности, влажный и водонасыщенный	от 40-55 до 331	3-8	1,85-2,3
(aQ _{II}) Гравийный грунт, водонасыщенный	от 32-90 до 300	1,5-3,5	2,2-2,6
(N ₂ kn) Глина полутвердая с включениями щебня	20-101	2-6	2,0-2,4
(N ₂ kn) Глина полутвердая без включений	20-40	6-10	1,8-2,2
(N ₂ kn) Гравийный грунт с глинистым заполнителем	31-101	2,-3,5	2,0-2,5
(N ₂ kn) Щебенисто-дресвяный грунт с глинистым заполнителем	40-90	3,5-4,5	1,8-2,4
(P _{2sl}) Глина полутвердая с включениями щебня и дресвы	40-47	3-9	1,6-2,4
(P ₁ k) Гипс трещиноватый и закарстованный	< 300	2-6	2,0-2,4
(P ₁ k) Гипс сохранный	250-700	0,5-1,5	2,0-2,8

Проведенные в скважинах каротажные работы позволили получить значения плотности и гамма-активности для каждого выделенного слоя. Полученные результаты приведены в таблице 3.3. С использованием этих параметров выполнено литологическое расчленение разреза.

Условия залегания водоупорного слоя (неогеновых глин) и его качество оценивались посредством следующих параметров:

- мощностей неогеновых отложений по ВЭЗ, данным бурения и каротажу в скважинах;
- удельного электрического сопротивления (УЭС) надгипсовой толщи;
- значения изоом R_k max в точке «К»;
- значения изоом R_k для $AB/2 = 12,5-50,0$ м;
- типов кривых ВЭЗ.

Поиск закарстованных и трещиноватых зон в толще кунгурских гипсов проводился по следующим геофизическим параметрам, характеризующим состояние карстующихся пород:

1. Измеренное кажущееся электрическое сопротивление пород разреза (R_k). Дает качественную оценку количеству слоев (по типам кривых ВЭЗ) и их электрических свойств.

2. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) отдельно взятого геоэлектрического слоя. Параметр характеризует литологические особенности неогеновых отложений, и физическое состояние прикровельной части гипсов. Значения УЭС менее 40 Ом·м характерны для неогеновых, преимущественно, глинистых отложений; значения от 40 до 70 Ом·м – для глинистых гравийных отложений; значения более 70 Ом·м характеризуют неогеновые отложения как преимущественно гравийные (условия отсутствия водоупора). Значения УЭС менее 300 Ом·м характерны для трещиноватых, закарстованных гипсов, с возможными карстовыми полостями, заполненными низкоомным глинисто-щебенистым материалом; относительно сохранные гипсы характеризуются значениями УЭС от 250 до 700 Ом·м.

3. Среднее нормированное электрическое сопротивление пород (R_{kn}). Позволяет разделить разрез в большом диапазоне на высокоомные и низкоомные породы. Области значений $R_{kn} < 0$ в средних частях кривых ВЭЗ интерпретируются как зоны распространения низкоомного глинистого материала – водоупора. В конечных частях кривых ВЭЗ (глубины залегания гипсовой толщи) такие значения характерны для зоны обводненных трещиноватых, закарстованных гипсов. Области значений $R_{kn} > 0$ в средних частях ВЭЗ соответствуют высокоомными гравийными отложениями – зонам отсутствия водоупора (водоупора неудовлетворительного качества). Большие значения характерны для более отсортированного гравия, меньшие для более глинистого. В конечных областях кривых ВЭЗ повышенные значения R_{kn} соотносятся с относительно сохранными и менее обводненными гипсами.

4. Дифференциальное электрическое сопротивление пород (R_t). В численных значениях приближается к истинному сопротивлению, а его аномальные значения ($R_t < 0$ или $R_t > 0$) фикс-

сируют присутствие неоднородностей в разрезе – зоны интенсивной трещиноватости с возможными карстовыми полостями. Кроме явных, интенсивных аномалий $R_t < 0$ или $R_t > 0$ отмечались и точки ВЭЗ с незакономерным изменением значений R_t в конечной ветви кривых ВЭЗ. Аномалии R_t локального вида установлены в южной и западной частях участка.

Закарстованные участки оконтуривались по комплексу карт изоом парметров R_{kn} , R_t , УЭС и R_k . Аномалии геофизических параметров, интерпретируемые как трещиноватые, закарстованные гипсы, установлены в северо-западной, западной, центральной и юго-восточной частях площадки (рисунок 3.7).

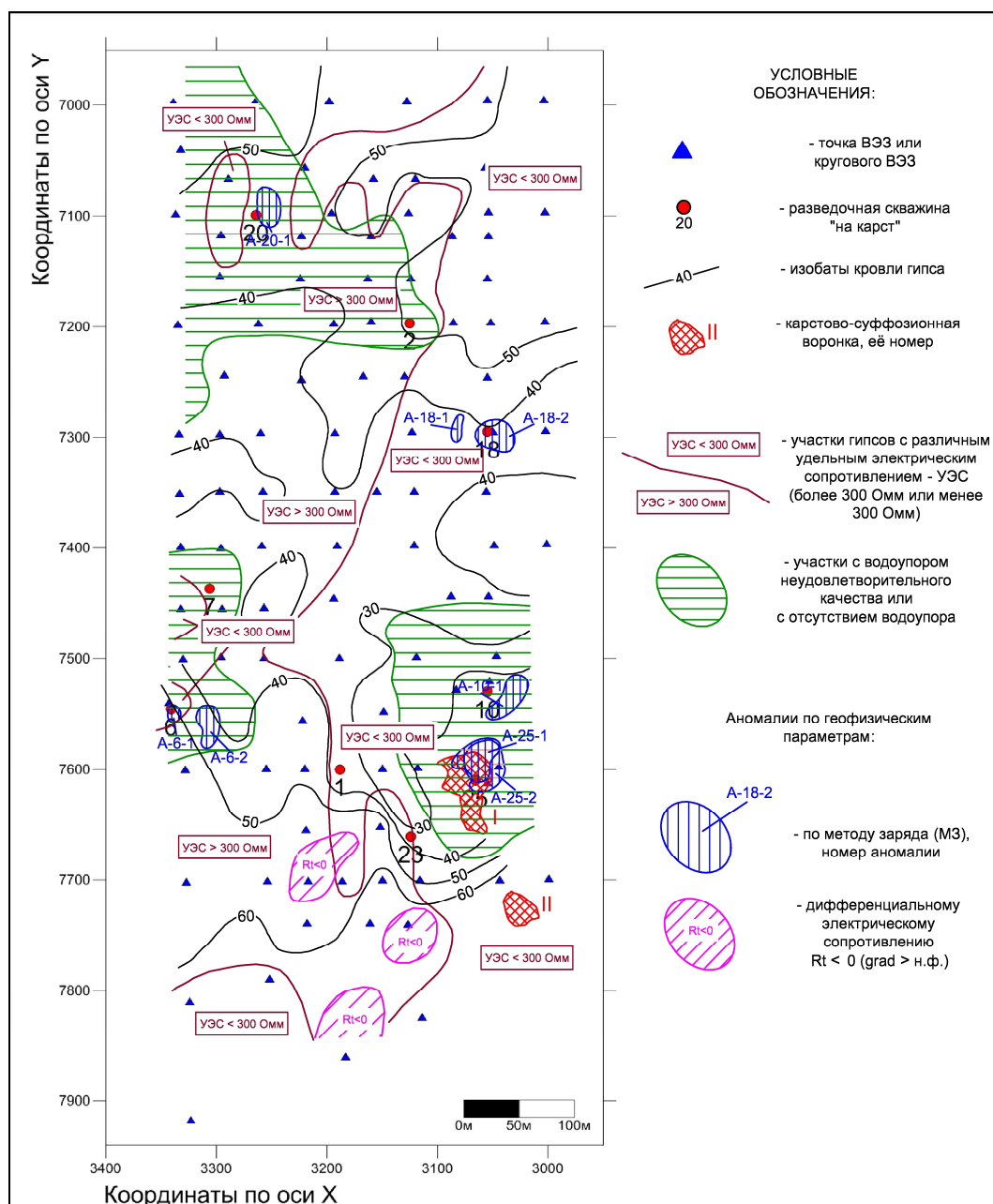


Рисунок 3.7. Карта комплексной интерпретации геофизических данных, полученных на исследуемом участке

Работы по методу заряда (МЗ) проводились в скважинах №№ 6, 10, 18, 20 и 25. Этими скважинами, на различных интервалах глубин, были вскрыты закарстованные или сильнотрещиноватые участки. Исследования проводились для оконтуривания в плане выявленных или вероятных карстовых полостей и разрушенных зон.

Для этого, в скважину, на глубину подошвы закарстованного участка, помещался электрод заряда «А». Второй питающий электрод «В» относился в «бесконечность», то есть на расстояние, равное 5-10 кратной глубине установки электрода заряда «А». На поверхности приемным электродом «М», с шагом 5,0 м, по системе радиальных профилей был измерен потенциал электрода заряда «А», второй электрод измерительной цепи «N» также отнесен в «бесконечность» - в противоположную сторону от электрода «В» и на такое же расстояние. Для выделения «ложных» аномалий от приповерхностных объектов геологического или другого происхождения, искажающих геоэлектрическое поле от глубинного заряда, по той же сети выполнялись измерения потенциала при положении электрода заряда «А» на устье скважины. Использовалась аппаратура АНЧ-3. Параметры аномалий околоскважинного пространства выявленных методом заряда (МЗ) (размеры, пространственное положение и геологическая интерпретация) приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Результаты использования метода заряда (МЗ) для поиска геофизических аномалий, интерпретируемых как результат развития карста

Номер скважины	6	10	18	20	25
Глубина установки электрода заряда «А», м	58,0	45,0	44,0	51,5	48,5 58,0
Исследуемый интервал, м	50,0-58,0	39,0-45,0	34,0-44,0	40,0-51,5	36,0-48,5 48,0-58,0
Наименование аномалии	A-6-1 A-6-2	A-10-1	A-18-1 A-18-2	A-20-1	A-25-1 A-25-2
Размеры аномалии в плане, м	12×16 38×20	45×22	20×10 35×32	17×14	45×45 17×20
Геологическая интерпретация аномалии	Зона разуплотнения пород надгипсовой толщи	Зона интенсивно трещиноватых гипсов с заполненными глиной карстовыми полостями	Зона трещиноватых гипсов с заполненными карстовыми полостями	Зона интенсивно выветрелых гипсов с заполненными карстовыми полостями	Зона карстовых полостей, заполненных глинистым и обломочным материалом
Значения УЭС гипсовой толщи, Ом·м	<300 >300	<300	<300	>300	<300

В ходе изучения околоскважинного пространства скважины № 25 при положении электрода заряда на глубинах 48 и 58 м, были установлены две аномалии. Аномалии интенсивные с заметным смещением максимума потенциала в сторону от устья скважины, геоэлектрически связанные между собой. В плане они имеют округлую форму (первая аномалия деформирована из-за влияния высокоомного объекта – целиковой зоны в гипсах незначительного размера), а их размеры составляют от 27 до 45 м в поперечнике. К северо-западу и северу отмечается высокоомная зона, соотносимая с поднятием кровли гипсов.

Трещиноватость и направление трещиноватости пород надгипсовой толщи и гипсов оценивалась по данным **круговых ВЭЗ (КВЗ)** в четырех точках. В районе КВЗ №№ 1 и 3, которые расположены в центральной и северной частях участка изысканий, трещиноватость пород надгипсовой толщи развита в субмеридианальном направлении. Трещиноватость заметная, коэффициент анизотропии $L = 1,13-1,14$. Трещиноватость гипсов в районе КВЗ № 2 развита в субширотном направлении по азимуту 90 градусов, интенсивная, коэффициент анизотропии L достигает 1,26. В районе провала на юго-востоке площадки (КВЗ № 4 – скважина № 25), в надгипсовой толще отмечается трещиноватость субмеридианального направления, заметная, с коэффициентом анизотропии $L = 1,13-1,17$. Трещиноватость в гипсах в районе скважины № 25 развита, преимущественно в субширотном направлении по азимуту 90°, интенсивная, $L = 1,34$.

В юго-восточной части исследуемой площадки, в месте образования провалов (район скважины № 25), с помощью комплекса геофизических методов были определены:

- наличие и контуры локального участка с отсутствием водоупора;
- литологические изменения в пределах каждого из геологических слоев;
- наличие сильнотрещиноватых и закарстованных гипсов в верхней части кунгурской толщи;
- размеры и контуры карстовых полостей в плане;
- формы погребенного рельефа.

Таким образом, применение геофизических методов позволило качественно и количественно дополнить информацию о геологическом строении исследуемой территории (рисунок 3.5), в том числе, получить данные об условиях залегания геологических слоев и особенностях погребенных форм рельефа. Кроме того, на данном примере можно видеть, что геофизические методы позволяют адекватно коррелировать геологическое строение между разведочными скважинами, что особенно важно при поиске погребенных карстовых оседаний и провалов.

3.3. Поиск зон суффозионного выноса частиц несвязных пород в трещины и полости

3.3.1. Обеспеченность поиска исходными данными

Пожалуй, главной проблемой, возникающей при поиске зон суффозионного выноса частиц несвязных пород путем анализа изменения их гранулометрического состава, является тот факт, что в процессе бурения пробы отбираются, как правило, в случайном порядке. Для составления отчета об инженерно-геологических изысканиях такой подход зачастую оправдан. Изыскатели ограничиваются количеством, достаточным для статистической обработки данных бурения. При таком подходе нет необходимости системно опробовать песчаный слой на всю его мощность и по всему изучаемому участку, тем самым прибегая к излишним, на первый взгляд, затратам. Тщательный, системный отбор проб проводится только по специальному требованию, указанному в техническом задании.

Именно по этой причине, а отнюдь не из-за высокой стоимости такого опробования или связанных с ним технических трудностей, в таблице 2.2 (см. раздел 2.1) вероятность обнаружения данного признака характеризуется как очень низкая. Однако она может стать достаточно высокой, если заранее запланировать отбор проб несвязных грунтов нарушенного сложения для определения их гранулометрического состава из всех скважин, вскрывающих один и тот же инженерно-геологический элемент, приблизительно на одной абсолютной отметке. При этом желательно, чтобы данный инженерно-геологический элемент имел более или менее выдержанную мощность при субгоризонтальном залегании и был распространен в пределах всей исследуемой площадки.

Примером такого рода «идеальных» исходных данных могут служить результаты целенаправленно спланированного опробования водонасыщенных песков, осуществленного в ходе инженерно-геологических изысканий, выполненных Фундаментпроектом Минмонтажспецстроя СССР в начале 1975 года. Работа проводилась при научном сопровождении ПНИИИСа Госстроя СССР [107] в г. Москве в районе Хорошевского шоссе, вблизи образовавшихся в 1969 году двух карстово-суффозионных провалов (рисунок 3.8).

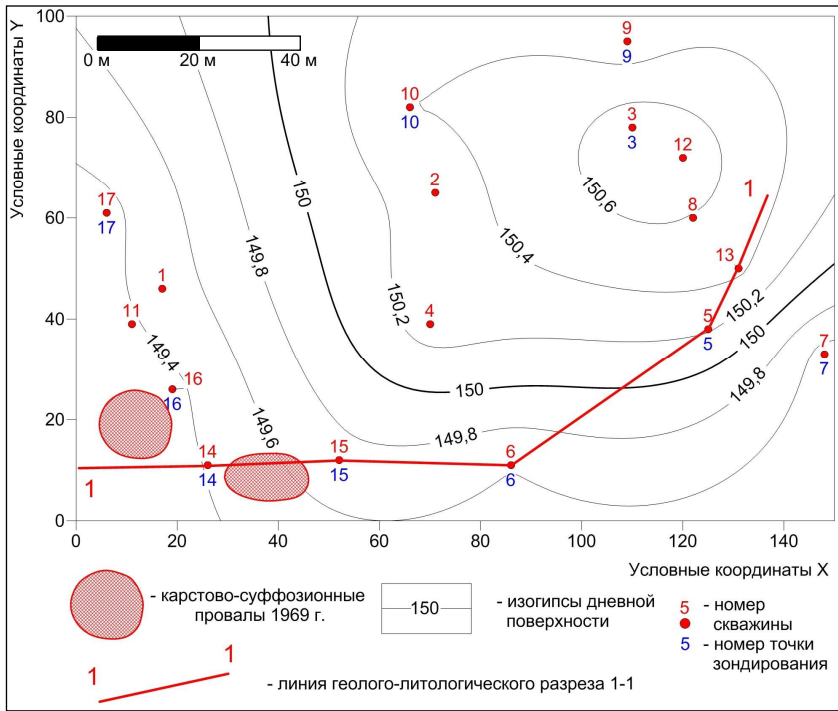


Рисунок 3.8. Карта фактического материала инженерно-геологических изысканий, выполненных на исследуемом участке

3.3.2. Краткая геологическая характеристика исследуемого участка

В верхней части геологического разреза исследуемой территории залегают четвертичные, юрские и каменноугольные отложения. Геологическое строение участка инженерных изысканий представляется в следующем виде (рисунок 3.9):

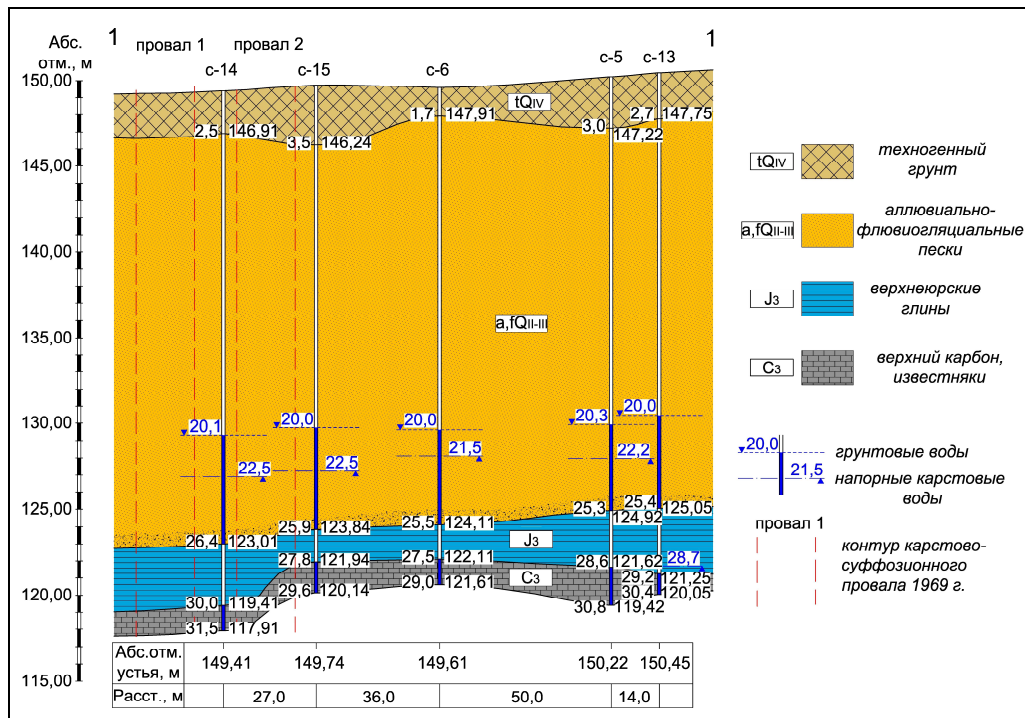


Рисунок 3.9. Схематический геолого-литологический разрез исследуемого участка по линии 1-1 (см. рисунок 3.8)

- с поверхности залегают техногенные ($t Q_{IV}$) отложения, мощностью 1,2-5,8 м, преимущественно, песчаного состава, с включениями обломочного материала;
- ниже, до глубины 24,8-26,5 м, залегают нерасчлененные, средне- и верхнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные ($a, f Q_{II-III}$) отложения, мощностью 20,4-23,9 м, представленные песками различной крупности (от пылеватых до гравелистых);
- четвертичные отложения подстилаются верхнеюрскими (J_3) глинами, мощностью от 0,7 до 3,8 м, подошва которых залегает на глубинах 26,6 – 30,0 м;
- под верхнеюрскими породами залегают отложения верхнего отдела каменноугольной системы (C_3) – известняки, доломиты с прослоями глин и мергелей.

Гидрогеологические условия верхней части разреза характеризуются наличием двух водоносных горизонтов. Первый от поверхности безнапорный горизонт грунтовых надкарстовых вод присутствует в аллювиально-флювиогляциальных песках выше верхнеюрского водоупора, на глубине 19,7-21,0 м (абсолютные отметки 128,8-130,6 м). Его мощность изменяется от 4,7 до 6,6 м. Второй напорный горизонт трещинно-карстовых вод залегает в толще карбонатных пород под юрскими глинами и вскрыт на глубинах 27,5-30,0 м (абсолютные отметки 119,4-122,2 м). Его пьезометрические уровни расположены на глубинах 21,0-25,1 м (абсолютные отметки 125,3-129,2 м). Величина напора присутствующих в нем вод изменяется от 3,9 до 7,5 м.

3.3.3. Анализ пространственного распределения параметров гранулометрического состава песчаных пород

Поскольку суффозионный вынос может затрагивать песчаные грунты, в которых присутствует безнапорный горизонт грунтовых надкарстовых вод при наличии в нем нисходящего фильтрационного потока, для анализа были отобраны образцы водонасыщенных песков с глубин 20,0-25,5 м. В этом диапазоне глубин залегают два слоя песчаных пород, отличающиеся по гранулометрическому составу. Первый (верхний) слой, кровлей которого является свободная поверхность грунтовых вод, а подошва залегает на глубинах 24,0-25,0 м, сложен песками мелкими, реже пылеватыми. Подстилающий его второй (нижний) слой, подошвой которого является кровля юрского водоупора, представлен песками средней крупности, реже крупными и гравелистыми (таблица 3.5).

Анализ распределения показателей гранулометрического состава водонасыщенных песков в горизонтальной плоскости осуществлялся в привязке к определенным диапазонам глубин их залегания, равных 1,5 м. Для песков первого слоя в расчет принимались пробы, отобранные с глубин 22,0-23,5 м, а для песков второго слоя – с глубин 24,0-25,5 м.

Таблица 3.5. Гранулометрический состав водонасыщенных песков, залегающих на исследуемом участке (коричневым цветом выделен заполнитель)

№ скважины	Глубина отбора образца (м)	Гранулометрический состав в %, размер частиц в мм											Содержание заполнителя Σ в пробе, %	Коэффициент неоднородности K(60/10)	
		галька	гравий				песок				пыль				глина
		>10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005			
Слой 1 (пески мелкие и пылеватые)															
1	22,0	-	-	-	-	0,1	8,0	80,5	8,6	1,1	0,5	1,2	1,7	1,9	
1	23,8	-	-	-	-	0,3	7,9	66,6	20,3	1,1	0,1	3,7	3,8	2,7	
4	23,5	-	-	-	-	2,5	22,3	67,2	3,8	1,6	0,6	2,0	2,6	2,0	
5	23,0	-	-	-	-	0,1	8,7	77,2	11,7	0,7	0,4	1,2	1,6	2,1	
5	24,5	-	-	-	-	1,7	20,4	65,8	6,3	2,4	0,4	3,0	3,4	2,4	
6	21,0	-	-	-	-	0,1	3,9	86,5	7,1	0,9	0,8	0,7	1,5	1,7	
6	23,0	-	-	-	-	2,7	13,7	76,3	4,2	0,6	0,2	2,3	2,5	1,9	
7	20,0	-	-	-	-	6,9	40,8	43,7	6,2	0,7	0,3	1,4	1,7	2,8	
7	22,0	-	-	-	-	0,6	12,4	73,4	12,0	0,6	0,1	0,9	1,0	2,3	
12	23,0	-	-	-	-	0,6	13,7	75,8	8,1	0,3	0,7	0,8	1,5	1,8	
14	21,0	-	-	-	-	2,8	23,4	64,5	6,5	1,6	0,4	0,8	1,2	2,0	
14	23,0	-	-	-	-	4,2	29,3	58,7	5,9	0,7	0,1	1,1	1,2	2,1	
16	23,5	-	-	-	-	2,7	24,4	68,9	2,6	1,0	0,2	0,2	0,4	1,8	
Слой 2 (пески гравелистые, крупные и средней крупности)															
1	25,1	18,7	11,1	11,3	44,6	2,4	6,2	4,1	1,0	0,2	0,1	0,3	0,4	5,8	
4	24,9	1,4	3,8	9,8	7,2	21,3	35,0	17,6	1,0	0,2	0,4	2,3	2,7	4,3	
6	25,0	3,3	0,8	7,7	3,7	11,5	39,1	27,8	3,0	0,3	0,2	2,6	2,8	3,3	
7	24,0	4,9	6,5	11,4	6,1	21,3	31,5	14,7	1,0	0,8	0,5	1,3	1,8	5,3	
10	25,5	-	0,3	6,9	5,2	29,5	38,0	16,1	1,7	0,7	0,3	1,3	1,6	3,6	
12	25,0	12,7	8,7	4,2	1,9	7,0	34,5	25,8	2,5	1,0	0,1	1,6	1,7	2,6	
14	25,0	4,2	3,7	3,9	1,9	11,7	53,2	16,7	1,0	1,5	0,3	1,9	2,2	3,0	
15	25,0	2,5	2,1	3,1	3,7	14,5	36,1	30,2	4,1	1,3	0,3	2,1	2,4	3,5	
16	25,2	3,3	8,3	12,7	5,0	13,6	31,9	22,2	0,4	1,4	0,2	1,0	1,2	4,4	

Для определения границы между заполнителем и скелетом песчаных грунтов, для каждого образца были построены дифференциальные кривые их гранулометрического состава (см. подраздел 2.3.1). В песках и первого (рисунок 3.10) и второго (рисунок 3.11) слоев заполнителем являются частицы размером менее 0,01 мм (пылевато-глинистая фракция).

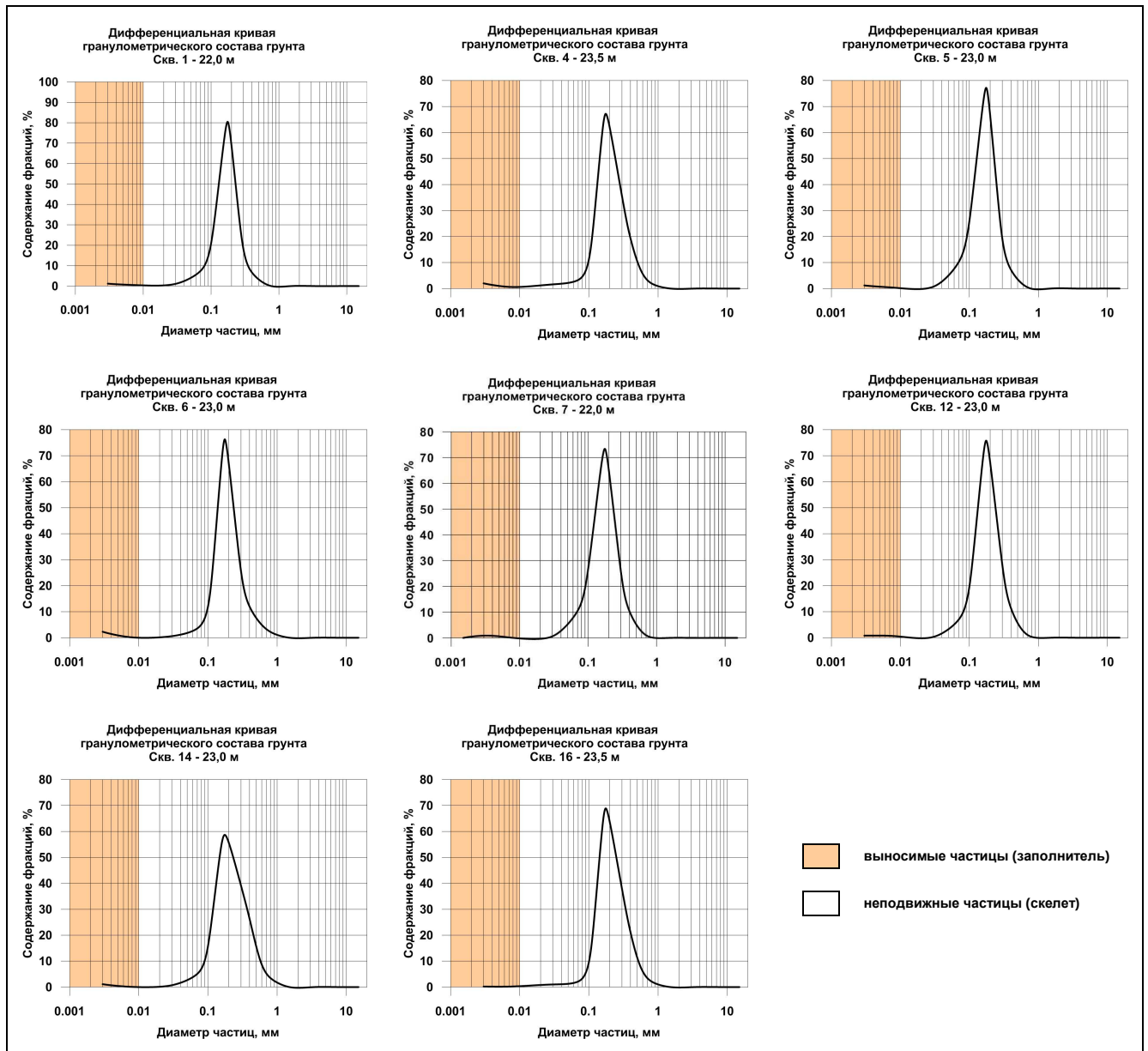


Рисунок 3.10. Дифференциальные кривые гранулометрического состава водонасыщенных песков первого слоя, залегающих на глубине от 22,0 до 23,5 м

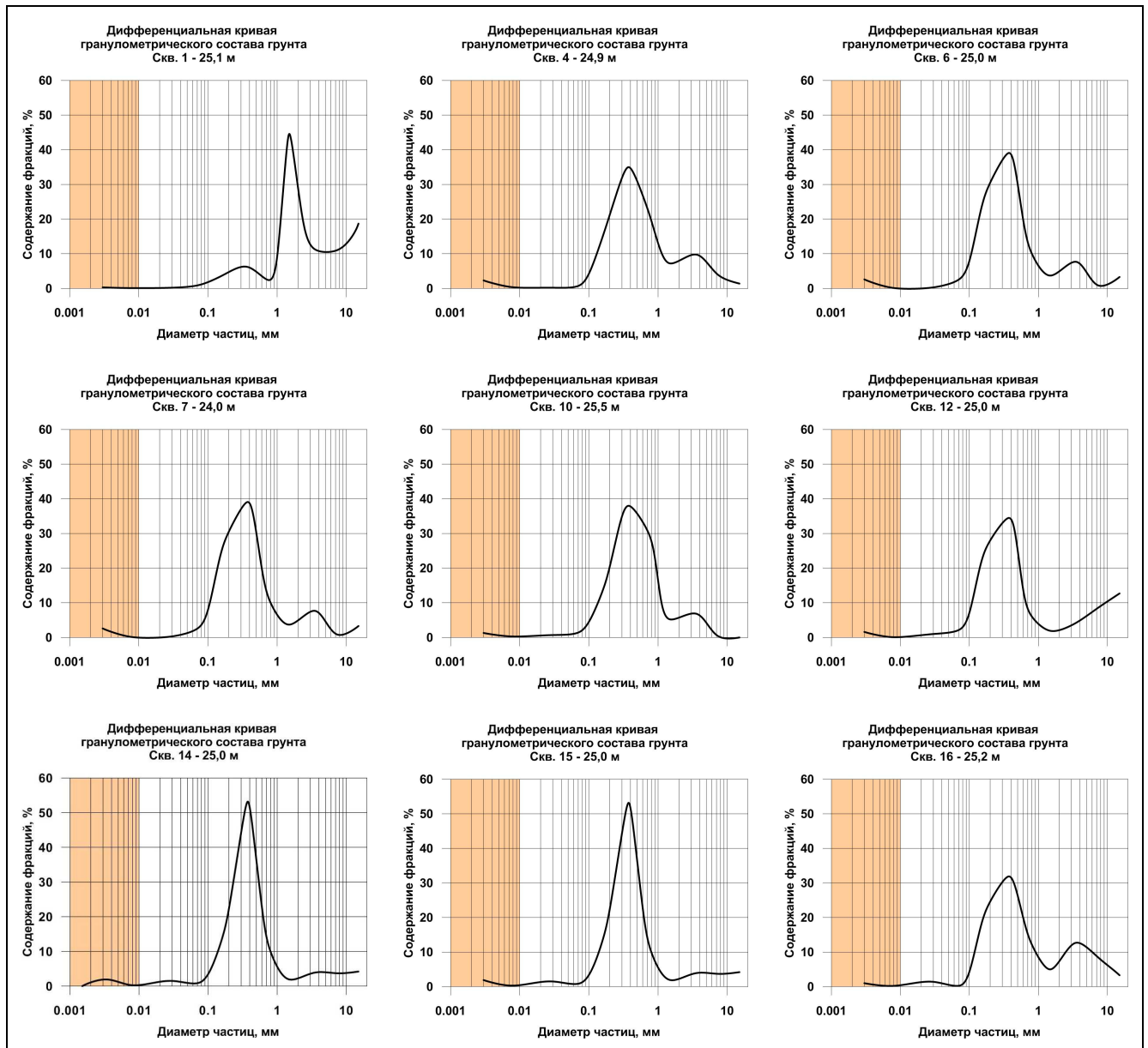


Рисунок 3.11. Дифференциальные кривые гранулометрического состава водонасыщенных песков второго слоя, залегающих на глубине от 24,0 до 25,5 м. См. условные обозначения на рисунке 3.10

Были построены карты-схемы, отражающие пространственное распределение процентного содержания заполнителя в водонасыщенных песках отдельно для каждого слоя. Их построение выполнялось в компьютерной программе «Surfer 12», с применением алгоритма *kriging*.

Рисунок 3.12 иллюстрирует пространственное распределение содержания заполнителя в пределах первого слоя. В выбранном интервале глубин оно изменяется от 0,4 до 2,6 % (таблица 3.5). При этом прослеживается определенная закономерность: минимальные значения наблюдаются в районе скважин №№ 14 и 16 (1,2 и 0,4 %, соответственно), а также скважин №№ 7 и 12 (1,0 и 1,5 %, соответственно). Остальные значения (от 1,6 до 2,6 %), приняты в качестве «фоновых». Столь низкие показатели в скважинах №№ 14 и 16 обусловлены наличием рядом с ни-

ми карстово-суффозионных провалов. Сквозное нарушение целостности водоупорного слоя в результате его деформирования (см. подраздел 2.2.2) привело к суффозионному выносу пылевато-глинистой фракции в карстующиеся породы, что отразилось на показателях гранулометрического состава водонасыщенных песков. В районе скважин №№ 7 и 12 карстового провалообразования не было зафиксировано, однако низкие значения процентного содержания пылевато-глинистых частиц в пробах, отобранных из этих скважин (по сравнению с «фоновыми» показателями), могут свидетельствовать о подготовке такого события. Помимо этого, в скважине № 7 прослеживается снижение процентного содержания частиц заполнителя и по глубине (таблица 3.5), что также может являться признаком суффозионного процесса.

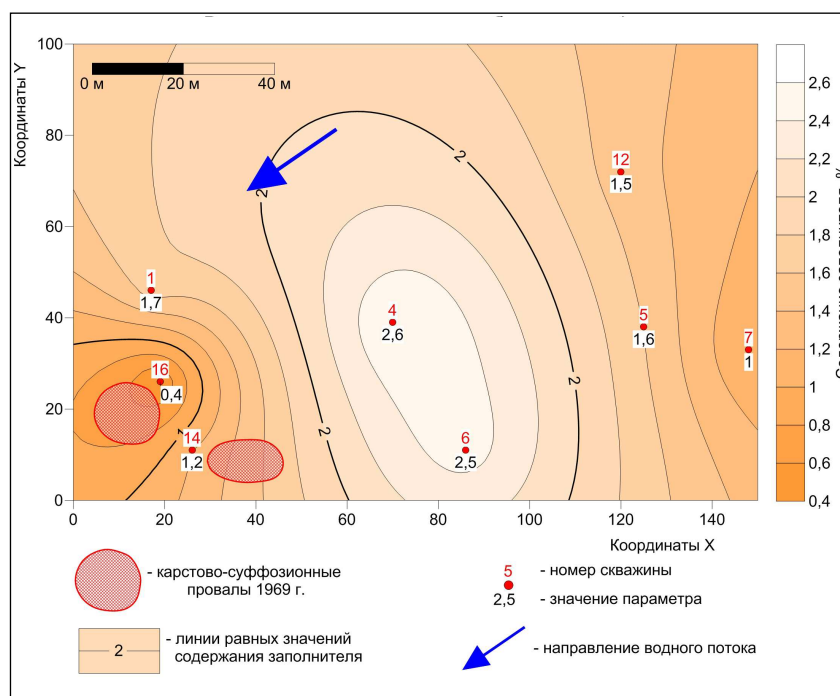


Рисунок 3.12. Карта-схема площадного распределения в пределах исследуемого участка процентного содержания частиц размером менее 0,01 мм (заполнителя) в водонасыщенных песках первого слоя в интервале глубин от 22,0 до 23,5 м

В водонасыщенных песках второго слоя процентное содержание заполнителя изменяется от 0,4 до 2,8%. Минимальные значения (0,4 и 1,2 %) зафиксированы, соответственно, в скважинах №№ 1 и 16. Анализ содержания частиц заполнителя во втором слое показал, что его изменение не связано с карстово-суффозионными провалами. Уменьшение количества частиц прослеживается с юго-востока на северо-запад исследуемого участка, перпендикулярно направлению движения грунтовых вод (рисунок 3.13) и местоположение скважин относительно провалов не сказывается на процентном содержании заполнителя. Подобная картина наводит на мысль о том, что грунты второго слоя претерпели суффозионные изменения задолго до образования провалов в 1969 года, либо, что также вероятно, севернее скважины № 1 находится не опробованный выработками участок с нарушенным или отсутствующим водоупором.

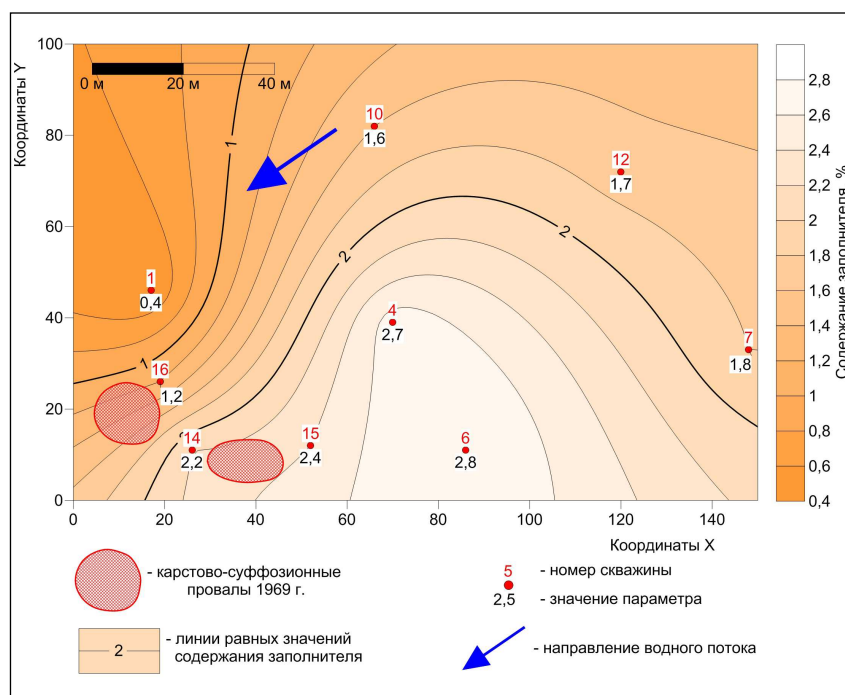
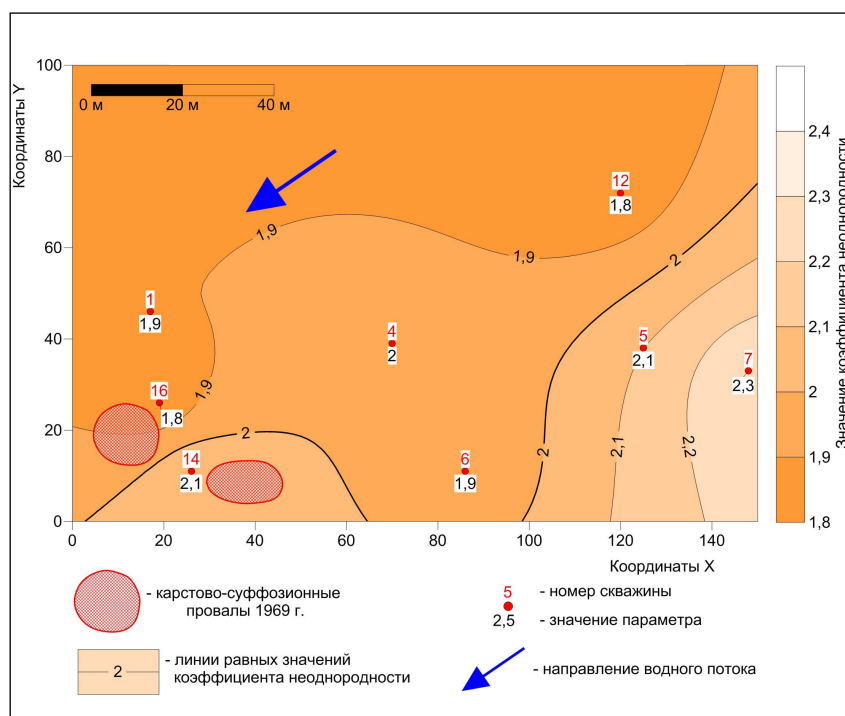


Рисунок 3.13. Карта-схема площадного распределения в пределах исследуемого участка процентного содержания частиц размером менее 0,01 мм (заполнителя) в водонасыщенных песках второго слоя в интервале глубин от 24,0 до 25,5 м

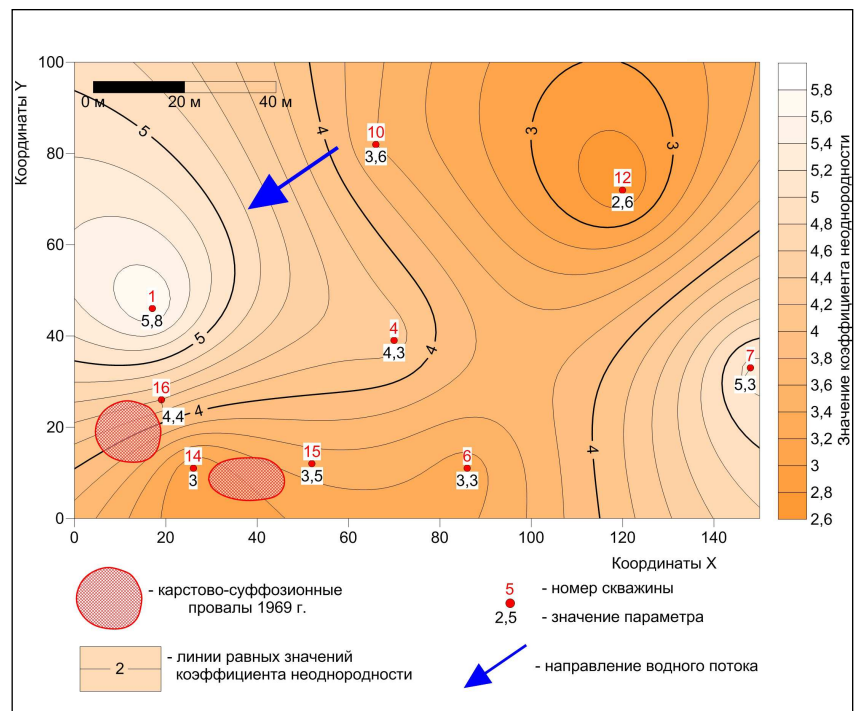
Ещё одним показателем, который может свидетельствовать о развитии суффозии, является степень неоднородности гранулометрического состава несвязного грунта (см. подраздел 2.3.3). Грунт, испытавший суффозионный вынос заполнителя, становится более однородным, по сравнению с исходным. Для каждого образца водонасыщенных песков, отобранного на исследуемом участке, был определен коэффициент неоднородности $K(60/10)$ – параметр, именуемый также степенью неоднородности C_u , значения которого приведены в таблице 3.5.

Рисунок 3.14. Карта-схема площадного распределения в пределах исследуемого участка коэффициента неоднородности водонасыщенных песков первого слоя в интервале глубин от 22,0 до 23,5 м



Были построены графические модели, отражающие пространственное распределение коэффициента неоднородности в обоих слоях. Водонасыщенные пески первого слоя по своему составу являются однородными, поэтому распределение этого параметра не является показательным с аналитической точки зрения. Коэффициент неоднородности по слою изменяется в небольших пределах: от 1,8 до 2,3 (рисунок 3.14). Водонасыщенные пески второго слоя преимущественно неоднородные: значения $K(60/10)$ варьируются в них от 2,6 до 5,8 (рисунок 3.15). Наименьшие значения параметра наблюдаются в скважинах №№ 12 и 14 (2,6 и 3,0 соответственно). Скважина № 14 находится вблизи карстово-суффозионного провала, где пески испытали суффозионный вынос заполнителя, чем и объясняется низкая величина коэффициента неоднородности. Однако, в районе скважины № 12 провалы, как уже было сказано выше, не наблюдались, и низкое значение рассматриваемого параметра может свидетельствовать о суффозионных изменениях, предшествующих будущему провалу.

Рисунок 3.15. Карта-схема площадного распределения в пределах исследуемого участка коэффициента неоднородности водонасыщенных песков второго слоя в интервале глубин от 24,0 до 25,5 м



Таким образом, согласно пространственному распределению коэффициента неоднородности в толще аллювиально-флювиогляциальных водонасыщенных песков, признаки суффозии наблюдаются в районе скважин №№ 12 и 14. По совокупности двух рассматриваемых критериев (процентное содержание заполнителя и коэффициент неоднородности гранулометрического состава), на исследуемом участке можно выделить несколько зон с признаками суффозионных изменений: это – районы скважин №№ 1, 14, 16 и скважин №№ 7 и 12 (рисунок 3.16).

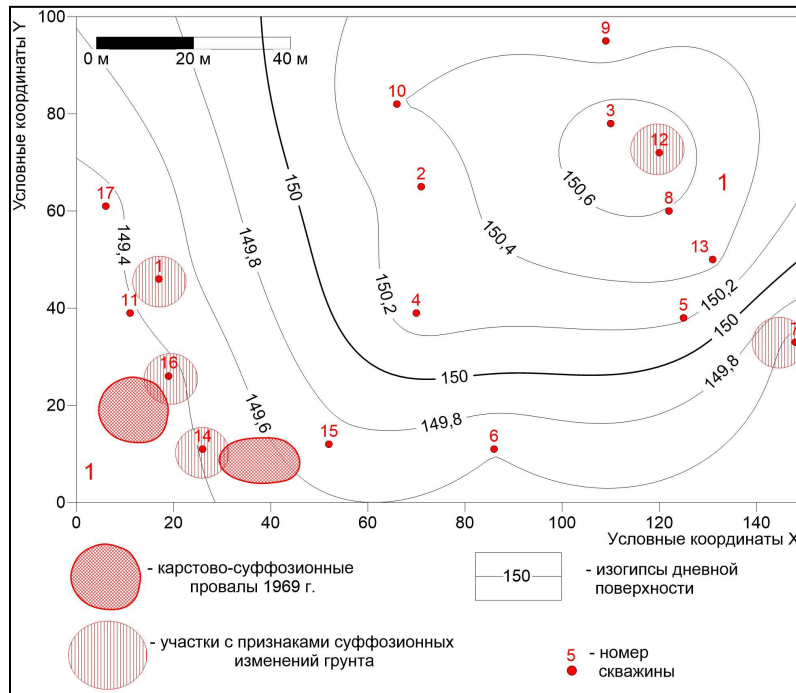


Рисунок 3.16. Результаты поиска в пределах исследуемого участка зон суффозионного выноса частиц водонасыщенных песчаных пород в трещины и полости

3.4. Поиск зон разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями

3.4.1. Краткая геологическая характеристика исследуемого участка

Поиск ослабленных зон, формирующихся в результате разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями осуществляется с помощью статического или динамического зондирования (см. раздел 2.4). В качестве примера практического применения метода поиска зон разуплотнения и разупрочнения выбран анализ данных статического зондирования, осуществленный на участке, расположенном в г. Красногорске Московской области в Павшинской пойме р. Москвы. В основу анализа легли материалы инженерных изысканий, выполненных на этом участке в 2011 году [108].

В геоморфологическом отношении, участок расположен на левом берегу р. Москвы, в её пойменной части. Поверхность участка несколько раз претерпевала изменения за счет искусственной перепланировки, связанной с освоением территории, и в настоящее время имеет небольшой уклон на юг, в сторону реки Москвы. Размер участка составляет примерно 150×100 м.

Геологическое строение на данном участке изучено до глубины 35 м. Разрез представлен отложениями верхнего отдела каменноугольной системы, среднего отдела юрской системы и современными четвертичными отложениями (рисунки 3.17–3.20).

Верхний карбон вскрыт на глубинах 9,6–14,2 м и представлен дорогомилловским (C_{3dr}) и хамовническим горизонтами (C_{3hm}). Толща сложена преимущественно карбонатными породами – известняками и доломитами различной степени разрушенности и закарстованности, с подчиненными прослоями мергелей и глин.

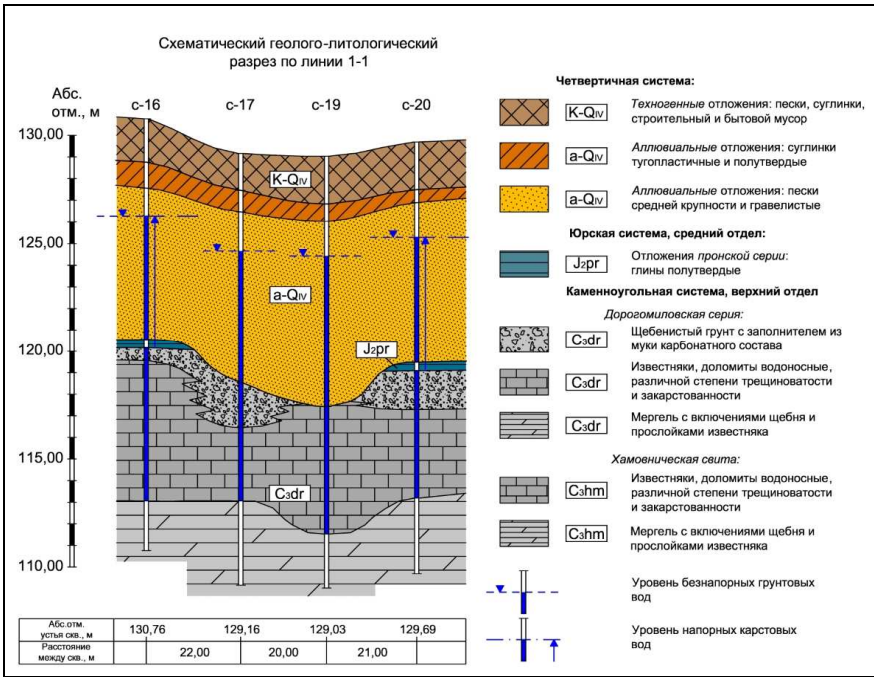


Рисунок 3.17. Схематический геолого-литологический разрез исследуемого участка по линии 1-1 (линии разрезов показаны на рисунке 3.21)

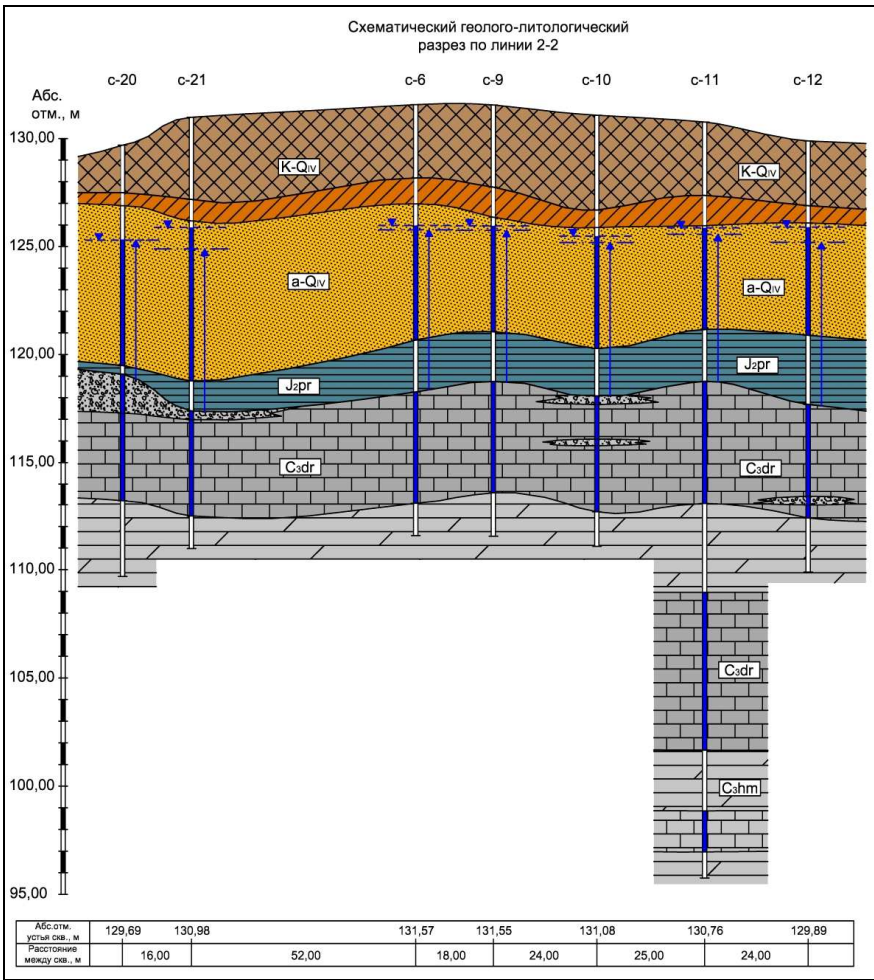


Рисунок 3.18. Схематический геолого-литологический разрез исследуемого участка по линии 2-2. Условные обозначения см. на рисунке 3.17

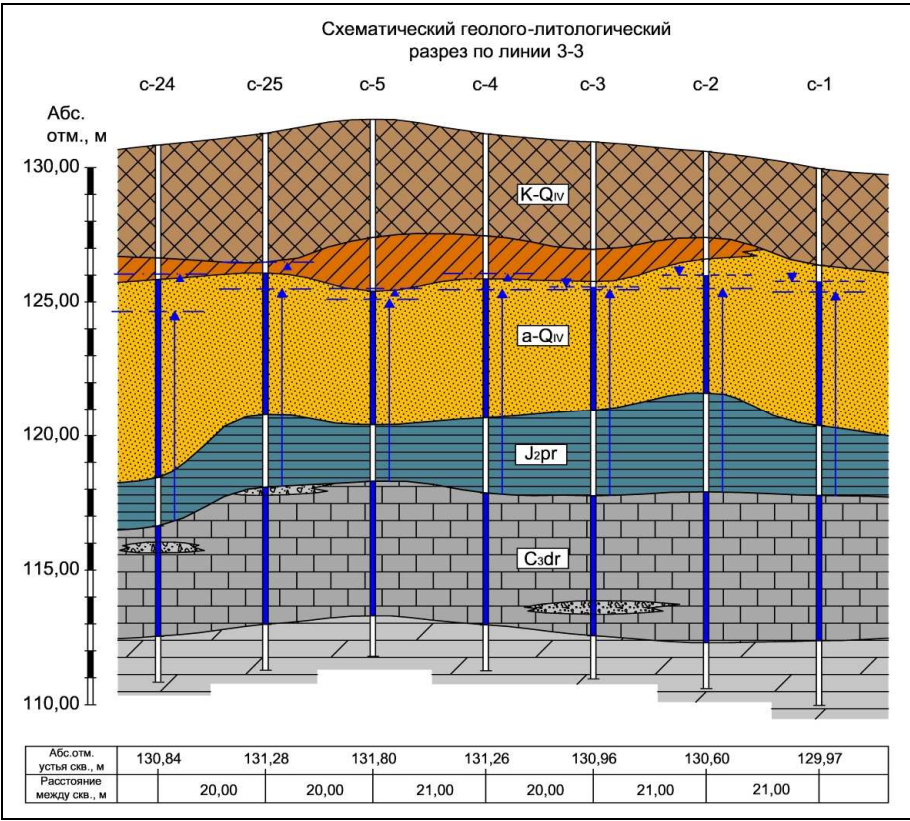


Рисунок 3.19. Схематический геолого-литологический разрез исследуемого участка по линии 3-3. Условные обозначения см. на рисунке 3.17

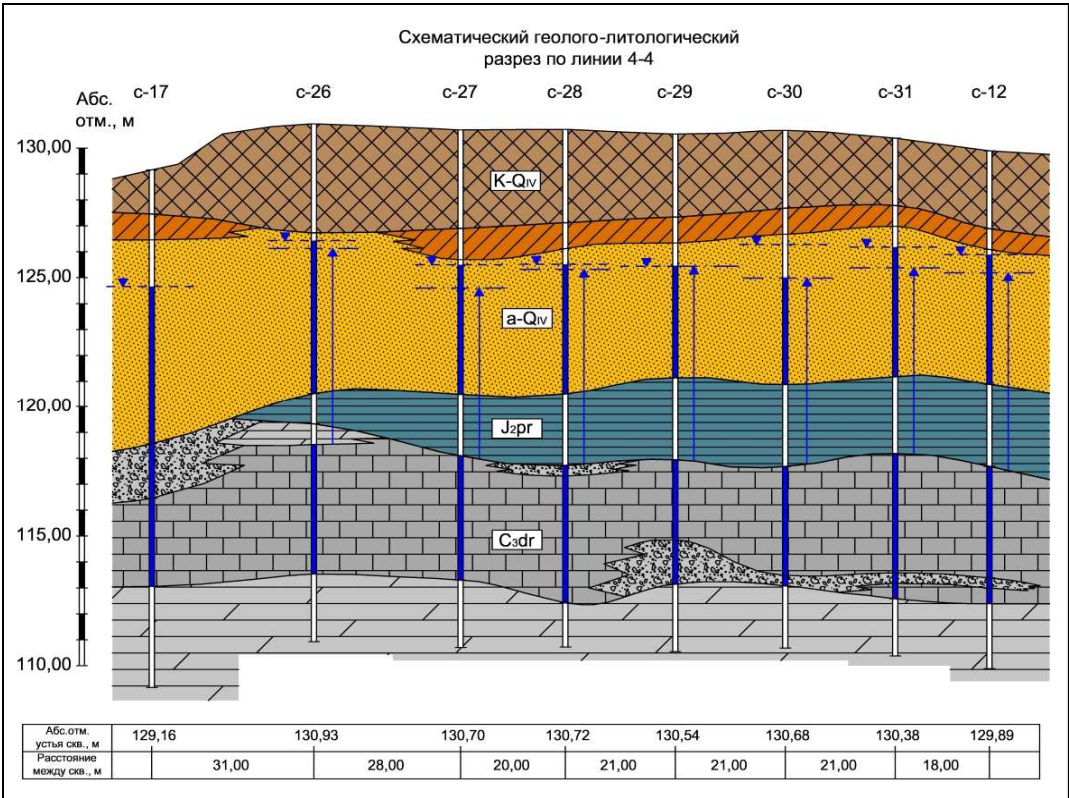


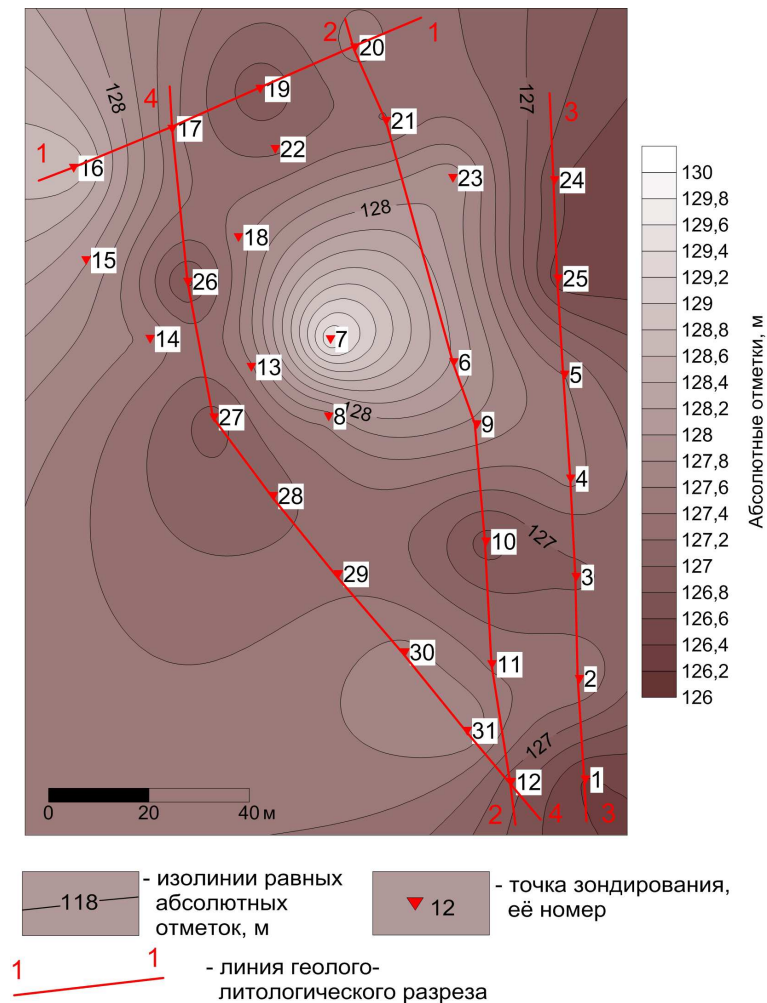
Рисунок 3.20. Схематический геолого-литологический разрез исследуемого участка по линии 4-4. Условные обозначения см. на рисунке 3.17

Отложения средней юры представлены глинами пронской (J₂pr) серии келловейского яруса. Они залегают на глубинах 8,4-12,4 м и имеют среднюю мощность 1,5-3,5 м. Однако, вблизи северной границы участка юрские отложения полностью размыты (скважины и точки статического зондирования №№ 17 и 19), и вышележащие песчаные грунты залегают непосредственно на толще каменноугольных отложений.

Современные четвертичные отложения представлены пойменным аллювием (a-Q_{IV}), повсеместно перекрытым техногенными грунтами (K-Q_{IV}). Пойма сложена песками средней крупности и гравелистыми, а также суглинками тугопластичными и полутвердыми, залегающими в кровле аллювия. Мощность песчаных отложений варьируется от 2,4 до 8,9 м, а глинистых от 0,4 до 4,4 м. Суммарная мощность аллювия составляет 4,8-9,9 м. Техногенные грунты представляют собой неоднородную песчано-глинистую толщу, мощностью от 0,3 до 4,4 м.

Гидрогеологические условия характеризуются наличием двух водоносных горизонтов: надъюрского и верхнекаменноугольного. Напорно-безнапорный надъюрский водоносный горизонт грунтовых надкарстовых вод вскрыт на глубинах 4,2-6,7 м от поверхности земли и залегает в толще аллювиальных песков, выше кровли юрских глин. Пьезометрические уровни отмечены на глубинах 4,8-6,3 м, напор достигает 0,4 м. Верхнекаменноугольный водоносный горизонт карстовых вод имеет напорный характер и вскрыт на глубинах 9,6-14,2 м. Пьезометрические уровни зафиксированы на глубинах 4,6-6,8 м, величины напоров составляют 5,7-8,0 м. Верхним водоупором для этого горизонта служат юрские глины, нижним – глинисто-мергелистые пачки верхнего карбона. В северной части участка, там, где размыт юрский водоупор, существует гидрогеологическое окно, через которое горизонты сообщаются между собой. Это подтверждают и зафиксированные здесь уровни обоих водоносных горизонтов, расположенные примерно на одной глубине.

На сегодняшний день в пределах участка каких-либо поверхностных проявлений карстовых процессов не наблюдается. Возможно, это связано с неоднократной перепланировкой территории. Однако, анализ поверхности подошвы техногенных отложений (рисунок 3.21) показал наличие небольших однозначно или предположительно замкнутых понижений в отдельных частях участка (районы точек зондирования №№ 1, 10, 19, 24, 25, 26, и 27). В районах скважин №№ 10 и 26 они однозначно имеют замкнутый характер и поэтому вполне могут представлять собой засыпанные карстовые оседания или провалы.



3.4.2. Анализ пространственного распределения показателей статического и динамического зондирования

В границах исследуемого участка водоупором являются юрские глины, которые отсутствуют в его северной части. Теоретически, в пределах одного участка, можно идентифицировать процессы разупрочнения и разуплотнения грунтов покрывающей толщи. Для этого было необходимо провести анализ данных выполненного на участке статического зондирования грунтов.

В первую очередь следует выяснить, аналитическое исследование каких слоев возможно в принципе, и определить граничные условия его применения. Покрывающая толща сложена неоднородными по литологическому составу грунтами, в число которых входят: глинистый водоупор, песчано-суглинистая аллювиальная толща и техногенный грунт неоднородного состава. Они обладают различными показателями сопротивления конусу зонда, поэтому целесообразнее рассматривать их по отдельности.

Техногенные грунты нельзя брать в расчет как раз в силу своей значительной неоднородности. Аллювиальные суглинки не выдержаны по своей мощности и характеризуются ее резкими изменениями. Кроме того, они подвергались замачиванию за счет инфильтрации атмосферных осадков сквозь толщу насыпных грунтов, что отразилось на их консистенции. Эти факторы могут влиять на общую картину пространственного распределения показателей зондирования, поэтому аллювиальные суглинки необходимо также исключить из расчета, а анализ начать с песчаной толщи.

Исключив верхнюю часть геологического разреза, можно определить верхнюю границу пригодной для анализа толщи, как подошву суглинков, которая имеет сложную конфигурацию. Для упрощения в качестве искомой границы принята горизонтальная плоскость, проходящая через самую нижнюю точку подошвы суглинков и расположенную на глубине 6,4 м. В расчетах предпочтительнее использовать глубину от поверхности земли, а не абсолютные отметки, так как расчет показателей зондирования зависит как раз от глубины погружения зонда. Песчаная толща включает в себя пески средней крупности с прослоями гравелистых. В виду того что разница показателей лобового сопротивления грунта на конусе зонда для этих разностей не является критичной, а условия их пространственного распределения в толще и мощность неравномерны, при проведении анализа их следует рассматривать как единую толщу. Ее нижнюю границу логично было бы провести по подошве, однако, в данном случае, мы ограничены глубиной проникновения зонда в грунт. В точке зондирования № 2 глубина погружения зонда минимальна и составляет 8,8 м; это и будет нижней границей для толщи песков. В итоге, определен первый выделенный для анализа интервал глубин с 6,4 до 8,8 м. Он включает в себя толщу водонасыщенных песков средней крупности с прослоями гравелистых.

Во второй интервал попадает глинистая толща, которая является перекрывающим карстующиеся породы водоупором. Её можно рассматривать полностью, не исключая отдельные прослой. Этому есть несколько объяснений:

- за исключением северной границы участка, глинистая толща распространена практически повсеместно;
- мощность глин составляет в среднем 1,5-3,5 м и уменьшается более или менее равномерно с юга на север, что не мешает выявить аномальные зоны (рисунок 3.22);
- полутвердая консистенция глин практически неизменна в пределах всего участка.

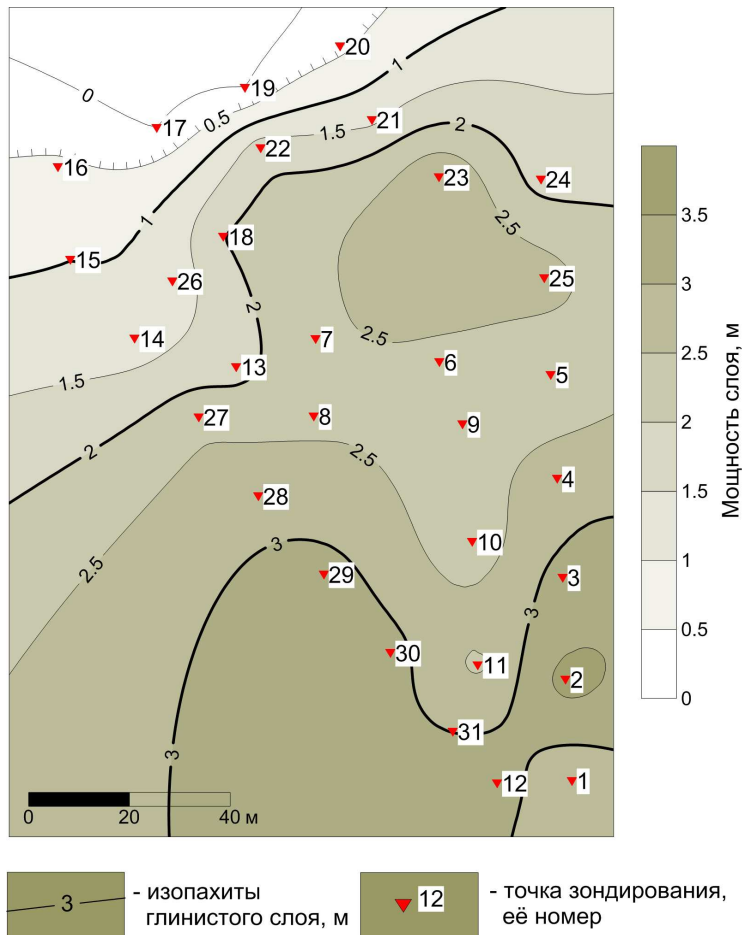


Рисунок 3.22. Карта-схема мощностей водоупорного слоя юрских глин, частично присутствующих на исследуемом участке

По данным статического зондирования были составлены схематические карты, отражающие пространственное распределение лобового сопротивления грунта погружению в него конуса зонда. Для этого в каждой точке были определены средние значения этой величины в пределах выбранного интервала глубин (q), то есть значения, осредненные по глубине. При построении моделей использовался программный продукт «Surfer 12» компании «Golden Software».

Песчаная толща была опробована практически на всю ее мощность, во всех точках статического зондирования. Глинистый водоупор опробован не во всех точках, по причине «отказа» зонда в гравийно-щебенистых прослоях песчаной толщи. В результате, в расчет не были включены несколько точек зондирования, расположенные в центральной части исследуемого участка, что несколько сужает возможности анализа, но общей картины пространственного распределения параметра q не искажает.

На рисунке 3.23 показано распределение средних значений показателей лобового сопротивления грунта для песчаной толщи в интервале от 6,4 до 8,8 м. В пределах исследуемого участка «фоновые» значения этого показателя составляют около 20 МПа. На карте отчетливо выделяется несколько участков с пониженными, по сравнению с «фоновыми», значениями параметра q , а именно:

- 1) в районе точки статического зондирования № 28 значения q падают до 13 МПа;

2) вблизи точек статического зондирования №№ 9 и 10 эти значения снижаются до 12 и 10 МПа, соответственно;

3) в северной части площадки, в районе точек статического № 17 и №№ 19 и 20, значения параметра q опускаются до 9 и 12 МПа, соответственно;

4) в районе точки статического зондирования № 24 значения q падают до 15 МПа.

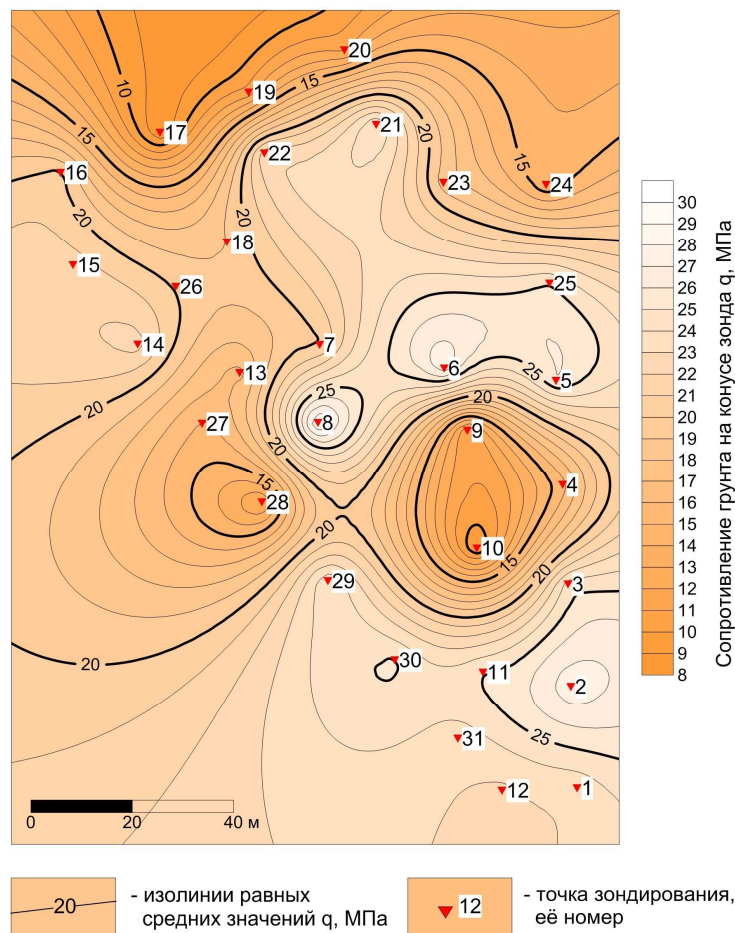


Рисунок 3.23. Карта-схема пространственного распределения в пределах исследуемого участка среднего лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песчаной толщи в интервале глубин 6,4-8,8 м

Рисунок 3.24 отражает пространственное распределение осредненного по глубине показателей лобового сопротивления грунта при статическом зондировании в толще глинистого водопора, где «фоновые» значения q соответствуют 2,0-2,6 МПа. Ослабленные участки зафиксированы в районе точек статического зондирования № 28 (q падает до 1,6 МПа) и № 24 (значения q опускаются до 1,2 МПа).

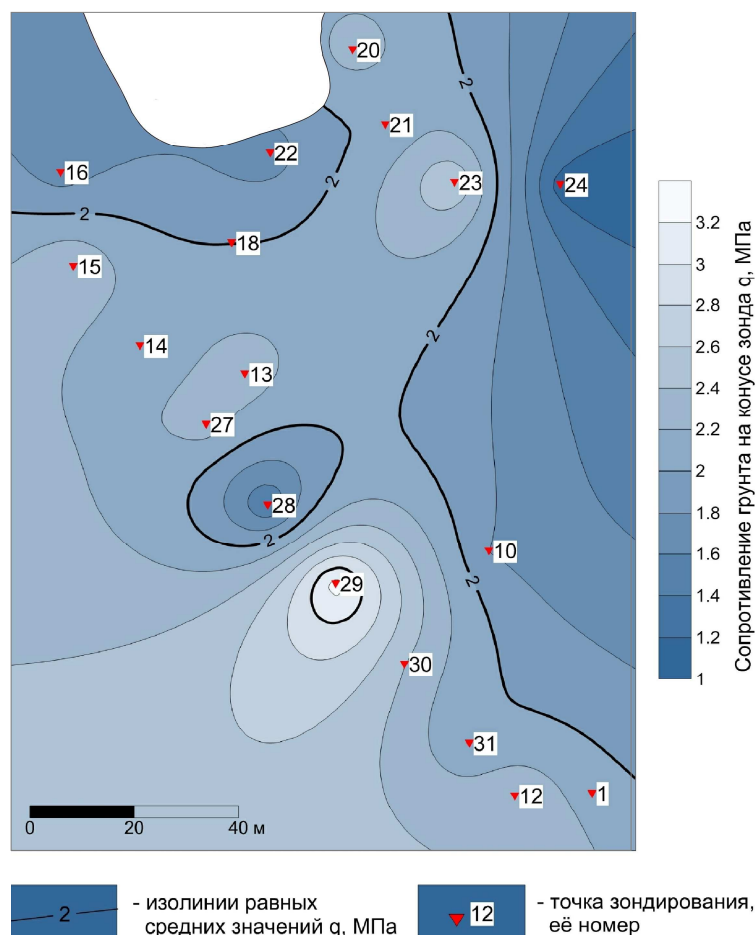
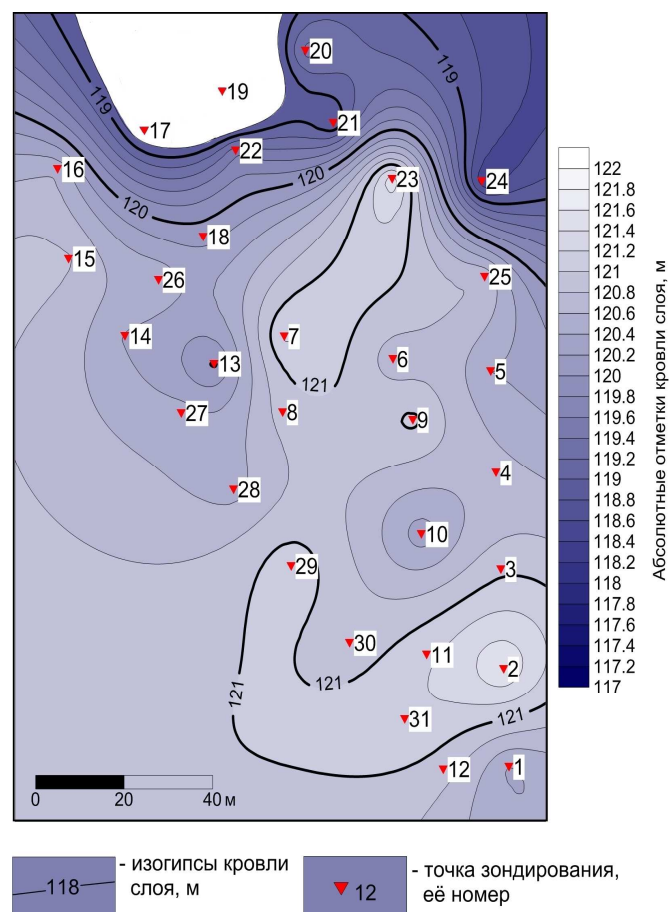


Рисунок 3.25. Карта-схема рельефа кровли среднеюрских глин в пределах исследуемого участка. См. примечание к рисунку 3.24



Как было сказано выше, в северной части исследуемого участка отсутствует водоупор, перекрывающий отложения верхнего карбона. Это послужило причиной суффозионного разуплотнения песчаной толщи. Подтверждением тому является значительное (до 9-12 МПа) снижение показателей лобового сопротивления грунта зонду в районе точек статического зондирования №№ 17, 19 и 20. Фильтрационное разрушение песчаной толщи происходит, как правило, при наличии нисходящего потока подземных вод, однако в рассматриваемой зоне разница между уровнями надкарстовых и карстовых вод практически отсутствует. Вероятно, градиент нисходящей фильтрации возникает при повышении уровня грунтовых надкарстовых вод во время весеннего таяния снега и при обильных атмосферных осадках, либо при понижении уровня карстовых вод. Именно в эти периоды создаются условия для частичного фильтрационного разрушения грунтов песчаной толщи.

На остальной площади исследуемого участка карстующиеся породы перекрыты глинистым водоупором, следовательно, снижение показателей его лобового сопротивления конусу зонда связано с его деформированием. Причина появления ослабленных зон в районе точек статического зондирования №№ 9, 10, 24 и 28 заключается, как было показано в разделе 2.4, в разрядке нормальных напряжений над карстовыми полостями, что выражается в снижении прочности глинистого слоя, связанной с его прогибом (рисунок 3.25) или нарушением целостности. Эти изменения закономерно отражаются и в вышележащих песчаных грунтах.

В пределах исследуемого участка крупные пустоты в карстующихся породах бурением не были вскрыты. Тем не менее, в отдельных местах в карбонатных породах присутствуют ослабленные зоны в виде прослоев известняка, разрушенных до состояния щебня и карбонатной муки, мощностью до 0,5-0,7м, залегающих вблизи кровли. Более того, по карте поверхности каменноугольных отложений прослеживаются характерные понижения в районе точек статического зондирования №№ 24 и 28 (рисунок 3.26), связанные, с наличием ослабленных прослоев в известняках. Именно в этих точках зафиксированы самые низкие показатели q для глинистого слоя, что можно видеть на рисунке 3.24.

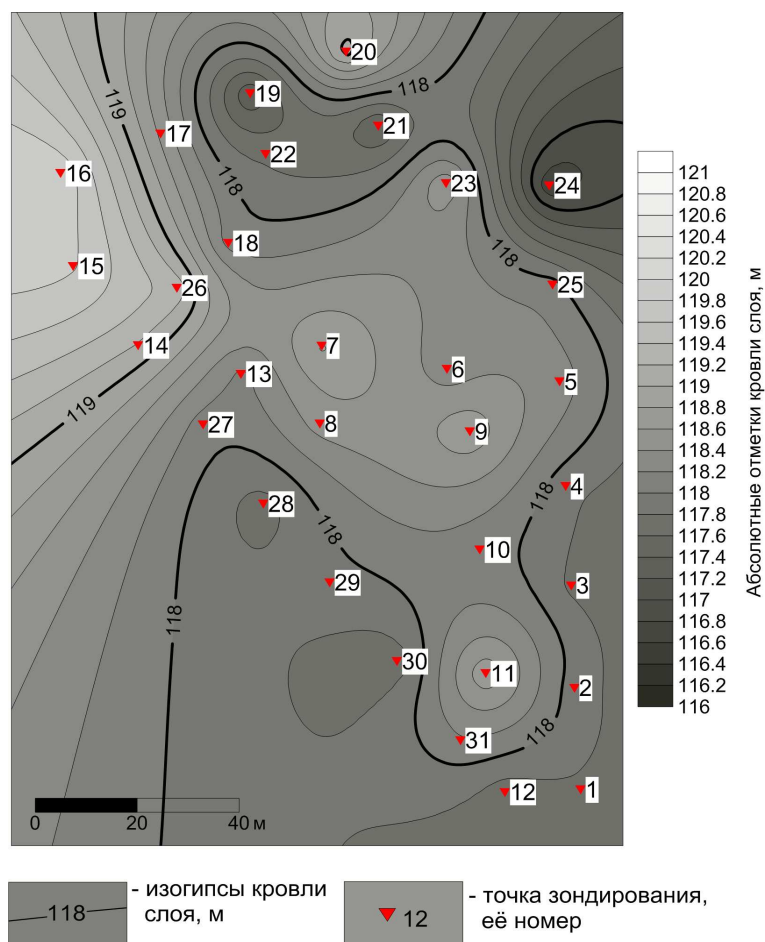


Рисунок 3.26. Карта-схема рельефа кровли карбонатных отложений в пределах исследуемого участка

В точке статического зондирования № 10 величина q составляет 1,8 МПа, то есть критического снижения параметра в пределах глинистого слоя не зафиксировано, однако в этой точке довольно четко прослеживается замкнутое понижение кровли поверхности водоупора и значительное разуплотнение песчаных грунтов. Одной из вероятных причин этой аномалии, может быть образование в глинистом водоупоре сквозных нарушений его сплошности, через которые происходит суффозионный вынос песчаных частиц в трещины и полости, присутствующие в карстующихся породах.

Таким образом, специальный анализ данных статического зондирования выявил в пределах исследуемого участка аномальные зоны в грунтах покрывающей толщи, а параллельный анализ особенностей залегания слагающих ее пород позволил определить природу этих зон. В результате появилась возможность сделать вывод о наличии здесь признаков подготовки карстового провалообразования.

3.4.3. Возможности прослеживания изменения во времени картины разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями

Наиболее типичным закономерным изменением во времени состояния массива дисперсных пород является их уплотнение под действием гравитационных сил. Это касается как естественных массивов, так и толщ, возведенных искусственным путем. Однако эта закономерность нарушается при влиянии некоторых внешних факторов. В условиях покрытого карста, такими факторами могут служить карстовые и суффозионные процессы. В этих случаях локально могут формироваться участки разуплотнения или разупрочнения грунта. Ниже приведен пример того, как может измениться состояние покрывающей толщи за несколько лет в районе активного развития покрытого карста.

Исследуемая площадка расположена в г. Дзержинске Нижегородской области, на территории Игумновской ТЭЦ. На ней, в разное время, были выполнены инженерные изыскания, в состав которых, помимо бурения скважин, входили испытания грунтов статическим (1982 и 1993 гг.) и динамическим (1982 г.) зондированием. Так как динамическое зондирование было выполнено только в период изысканий 1982 г., а прямое сопоставление данных статического и динамического зондирования невозможно, для анализа были отобраны результаты только статического зондирования.

В геоморфологическом отношении площадка расположена на левом берегу р. Оки, в пределах второй надпойменной террасы. Геологическое строение верхней части разреза представлено четвертичными отложениями: аллювиальными (aQ_{II}), преимущественно, мелкими песками, залегающими до глубин от 44,0 до 47,5 м, и перекрытыми насыпными грунтами, мощностью от 0,2 до 3,5 м. Четвертичные отложения подстилаются региональным водоупором – татарскими (P_{2t}) глинами верхнего отдела Пермской системы. Грунтовые надкарстовые воды залегают на глубине 17,5-19,3 м; их свободная поверхность расположена ниже пьезометрической поверхности напорных трещинно-карстовых вод, которая залегает на глубинах 17,5-18,7 м.

Для корректного анализа данных статического зондирования, выполненного в разные годы, необходимо сравнивать одинаковые интервалы глубин. Для этого необходимы определенные критерии, ограничивающие эти глубины. Во-первых, из анализа необходимо исключить толщу насыпных грунтов, в силу их резкой неоднородности. Во-вторых, необходимо учитывать глубину статического зондирования, которая имеет весьма большой разброс – от 2,8 до 14,6 м. В-третьих, необходимо выбрать точки статического зондирования, соответствующие этим параметрам. Таким образом, был определен интервал, пригодный для анализа (3,0-5,0 м) и выбран ряд точек статического зондирования, удовлетворяющих этим критериям.

По данным статического зондирования, выполненным в каждый из периодов инженерных изысканий, были построены карты-схемы площадного распределения средних значений сопротивления грунта конусу зонда (q) в пределах выбранного интервала глубин (рисунок 3.27) с шагом дискретности в 1 МПа. При построении был использован программный продукт Surfer 12 от компании Golden Software. Алгоритм построения: *Inverse Distance to a Power*.

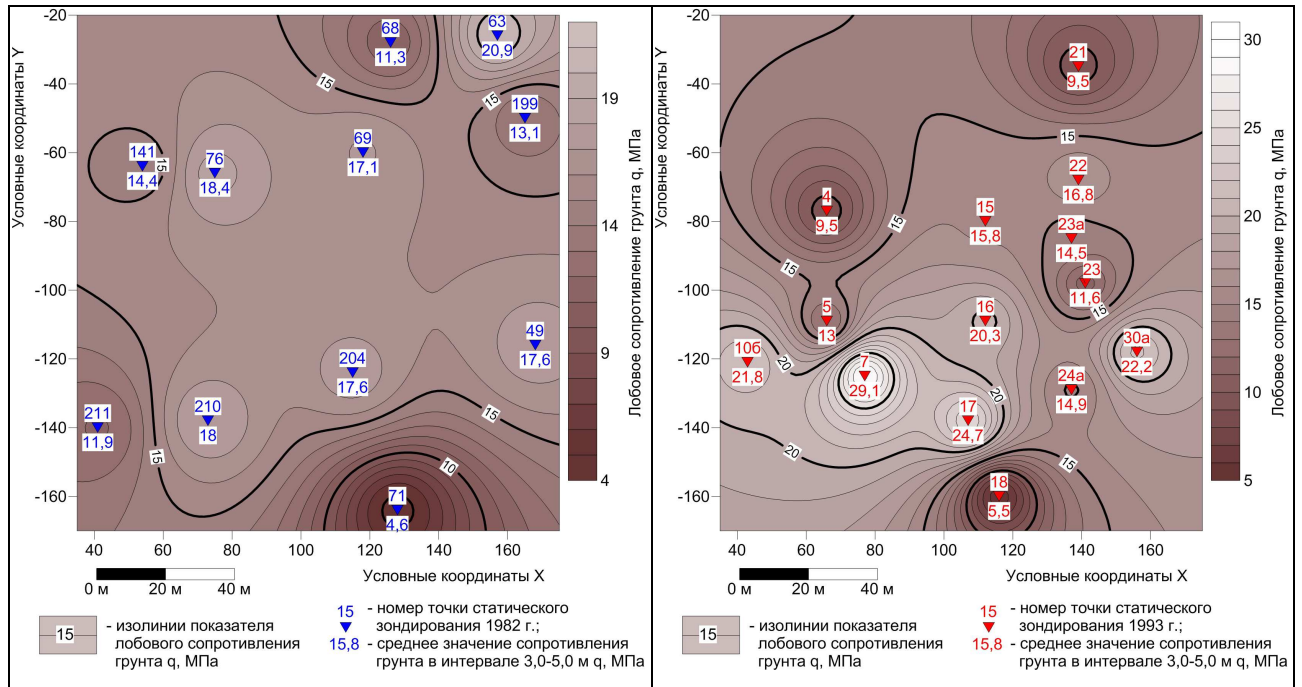


Рисунок 3.27. Распределение средних значений лобового сопротивления аллювиальных среднечетвертичных песков погружению в них конуса зонда (q) в интервале глубин 3,0-5,0 м на исследуемой площадке по данным 1982 (слева) и 1993 (справа) годов

На каждой из полученных карт хорошо определяются участки с пониженными, по сравнению с «фоновыми», показателями среднего лобового сопротивления грунта конусу зонда q . Так как карты построены в едином масштабе и в одних условных координатах, их сравнение возможно путем наложения друг на друга (рисунок 3.28). В результате такого сравнения, была построена синтетическая карта-схема, на которой были совмещены изолинии распределения показателей лобового сопротивления грунта q 1982 и 1993 гг. Масштаб карты позволил увеличить шаг дискретности до 2 МПа без потери информативности, что дало возможность избежать перегруженности карты изолиниями. Каждая точка пересечения изолиний параметра q 1982 и 1993 годов дает численное значение Δq :

$$\Delta q = q_{(1982)} - q_{(1993)}, \quad (3.1)$$

где Δq – разница между величинами q , замеренными в разные годы; $q_{(1982)}$ – величина q , замеренная в 1982 г.; $q_{(1993)}$ – величина q , замеренная в 1993 г.

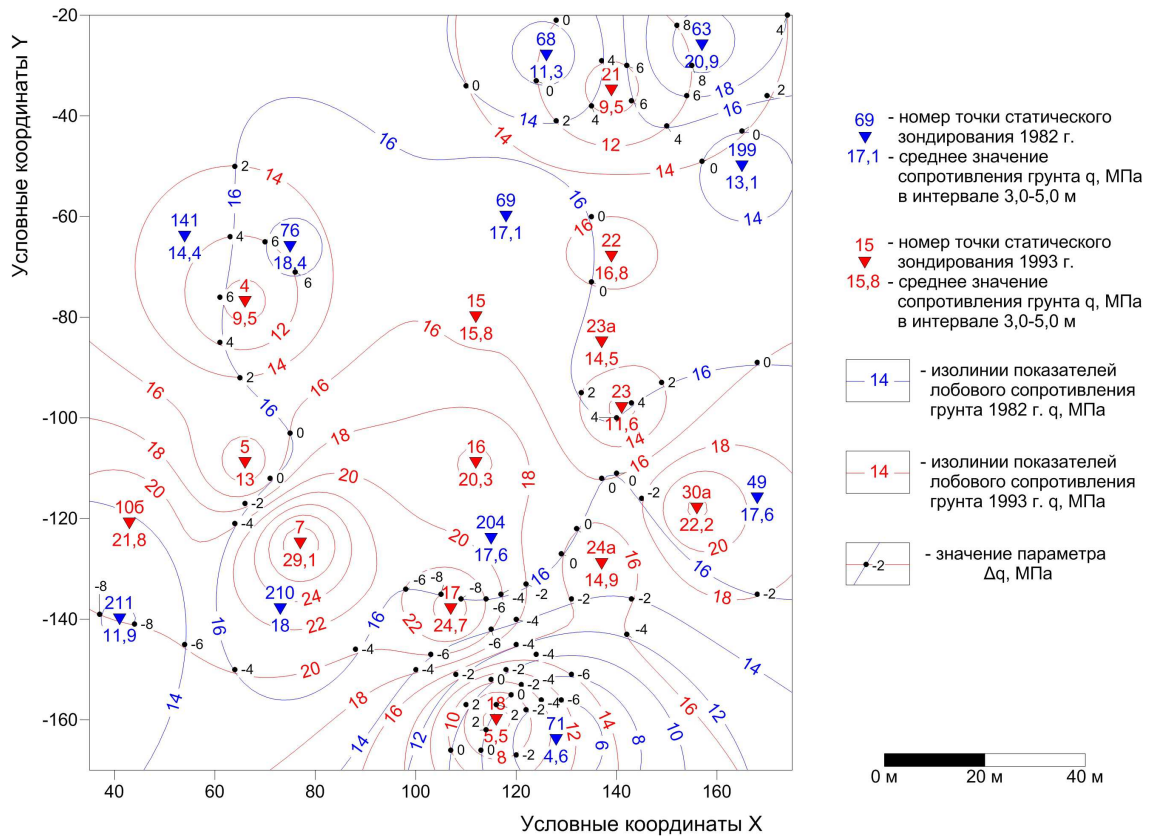


Рисунок 3.28. Синтетическая карта распределения параметра q на исследуемой площадке в 1982 и 1993 гг.

Таким образом, был получен набор точек, каждая из которых, помимо координат X и Y , имеет численное значение параметра Δq (МПа). Отрицательные значения параметра соответствуют уплотнению песков, слагающих покрывающую толщу, за 11 лет, положительные – об их разуплотнении. По полученным данным была построена карта (рисунок 3.29), отражающая распределение значений параметра Δq в пределах исследуемого интервала глубин. На карте выделяются два участка, характеризующиеся наибольшими (6-8 МПа) положительными значениями Δq , и соответственно, наибольшим снижением плотности песчаного грунта в пределах исследуемой толщи. Оба участка расположены в ее северной части. В то же время, южная часть площадки характеризуется отрицательными значениями Δq , что говорит о «нормальном» уплотнении песков.

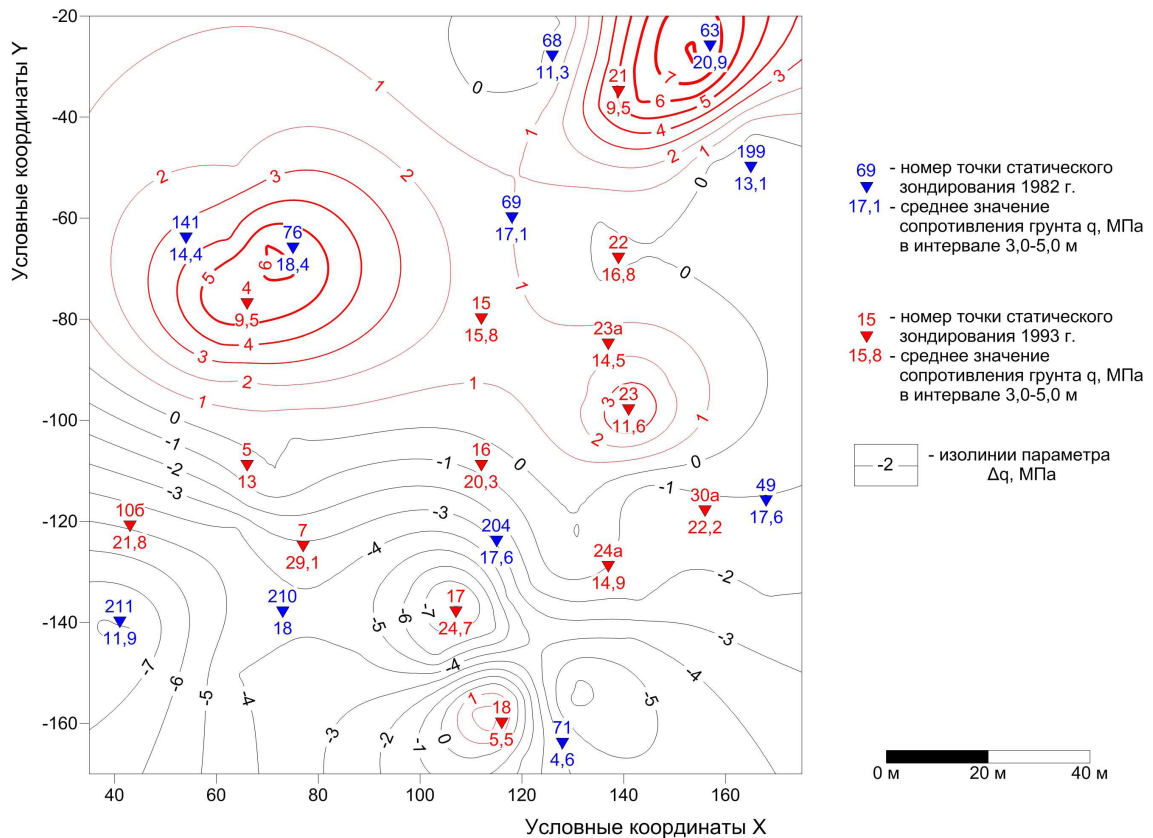


Рисунок 3.29. Карта распределения параметра Δq на исследуемой площадке

Как правило, статическое зондирование выполняется «до отказа», то есть, до глубины, на которой сопротивление грунта превышает технические возможности зондировочной установки по дальнейшему вдавливанию зонда. Чем ниже прочность грунта, тем глубже может погрузиться зонд. Таким образом, глубина погружения зонда может являться косвенным показателем для сравнительного анализа изменения состояния грунтовой толщи в разные промежутки времени. Косвенным, по двум причинам:

- 1) сравнению подлежат данные, полученные с помощью оборудования, обладающего сходными параметрами;
- 2) глубина статического зондирования также зависит от наличия крупнообломочных включений, так как при их большом количестве, «отказ» зонда может произойти при встрече с валуном, а не по причине чрезмерной прочности грунта.

Тем не менее, если перечисленные обстоятельства не станут помехой, глубина погружения зонда может служить дополнительной полезной информацией при анализе данных статического зондирования.

На исследуемой площадке зондирование выполнялось установками среднего типа в аллювиальных мелких песках, в которых крупные включения практически отсутствуют. На построенных картах максимальных глубин зондирования в 1982 и 1993 годах (рисунок 3.30) прослеживаются следующие тенденции:

- в 1982 году наибольшие (4,8-8,9 м) глубины зондирования, а, следовательно, наименьшие значения прочности грунта, наблюдались в южной половине площадки;
- в 1993 году наблюдалась противоположная картина: максимальные (11,2-14,6 м) глубины зафиксированы в ее северной части.

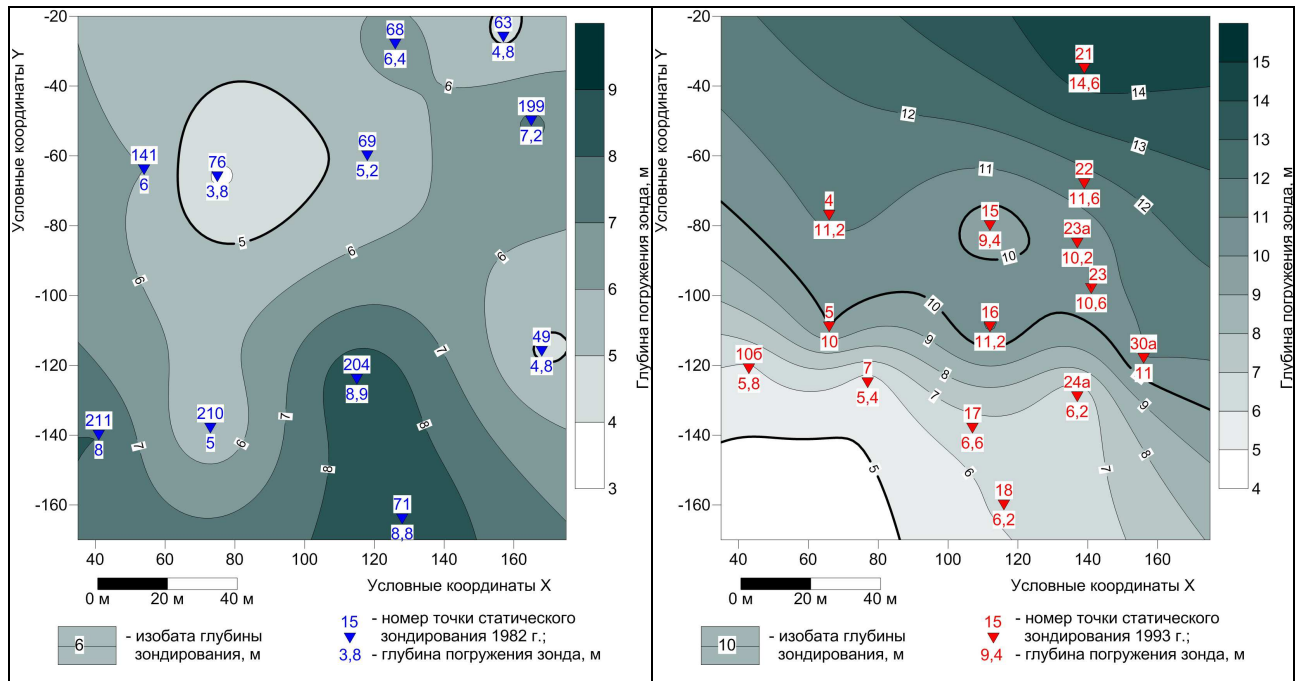


Рисунок 3.30. Карты максимальных глубин погружения конуса в точках статического зондирования, выполненного на исследуемой площадке в 1982 (слева) и 1993 (справа) годах

Отсюда следует, что южная часть площадки подверглась закономерному процессу уплотнения, а северная часть наоборот, претерпевает изменения в сторону снижения плотности или прочности грунта. Эти данные подтверждаются выводами, полученными в результате сравнения показателей лобового сопротивления грунта на конусе, приведенные ранее.

Из всего изложенного выше можно сделать некоторые выводы:

- имея данные статического зондирования, выполненного в разные годы, можно в динамике проследить изменения, которые испытала покрывающая толща (или ее часть) за определенный период времени;
- помимо прямых показателей зондирования (лобовое сопротивление и боковое трение), для анализа можно использовать и косвенный показатель – глубину погружения зонда;
- полученная информация будет полезна, так как она позволяет создать представление о динамической картине изменения прочности покрывающей толщи в связи с оценкой потенциальной карстовой опасности.

3.5. Выводы

1. Поиск признаков подготовки карстового провалообразования представляет собой процедуру целенаправленного изучения конфигурации трехмерных поверхностей, ограничивающих слои горных пород, которые составляют покрывающую толщу, и полей некоторых параметров, характеризующих состав и свойства этих пород, которые в графическом выражении также представляют собой трехмерные поверхности. Идентификация искомых признаков осуществляется комплексно, во взаимном сопоставлении признаков, выявляемых разными методами, и требует сравнительного анализа всей имеющейся информации о карстующихся и покрывающих породах, а также о гидродинамическом режиме присутствующих в них подземных вод.

2. На примере карстоопасной территории, расположенной в Республике Башкортостан, 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, в роли которых выступают границы между слоями горных пород, обнаруживать на них замкнутые понижения и оценивать состояние пород внутри этих форм. Эти операции являются главным инструментом палеогеоморфологического анализа, с помощью которого осуществляется поиск и идентификация погребенных карстовых провалов и оседаний.

3. Анализ пространственного распределения параметров гранулометрического состава водонасыщенных песков на участке двух карстово-суффозионных провалов, образовавшихся в 1969 г. на северо-западе г. Москвы, позволил обнаружить закономерное снижение процентного содержания в них 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. 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.

4. 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, если это необходимо, определенных интервалов глубин для осреднения, как это было сделано на потенциально карстоопасном участке, расположенном в г. Красногорске Московской области. Среди обнаруживаемых таким образом «ослабленных»

зон различного происхождения с пониженным сопротивлением конусу зонда следует однозначно идентифицировать искомые зоны разупрочнения.

5. Сопоставление данных технологически однотипного статического или динамического зондирования, осуществленного на одной территории в разные годы, позволяет значительно расширить 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 можно видеть на примере площадки Игумновской ТЭЦ, расположенной в г. Дзержинске Нижегородской области, на территории активного развития покрытого карста.

4. Методика локальной прогностической оценки карстовой опасности

4.1. Прогностическая оценка потенциальной возможности образования карстовых провалов в пределах площадки инженерно-геологических изысканий

4.1.1. Построение прогнозной карты потенциальной возможности карстового провалообразования

Возможности локальной оценки карстовой опасности, в основу которой положены поиск и идентификация признаков подготовки карстового провалообразования, целесообразно продемонстрировать на примере кратко охарактеризованного в подразделе 3.2.2 участка, расположенного на северо-западе г. Москвы, поскольку здесь обнаружен полный набор таких признаков и присутствуют уже образовавшиеся карстовые провалы. В дополнение к уже данной характеристике геологических условий участка (рисунок 3.8), можно добавить следующее:

1. Содержащие прослои глин и мергелей верхнекаменноугольные (C_3) известняки и доломиты, мощностью 22,2-27,4 м, подошва которых залегает на глубинах 50,0-56,0 м, подстилаются среднекаменноугольными (C_2) трещиноватыми и закарстованными известняками и доломитами, вскрытая мощность которых составляет 26,8-52,0 м.

2. Ниже присутствующего в верхнекаменноугольных известняках и доломитах, перекрытого верхнеюрскими глинами и подстилаемого верхнекаменноугольными глинами и мергелями второго водоносного горизонта расположен третий водоносный горизонт трещинно-карстовых вод. Он также приурочен к верхнекаменноугольным известнякам и доломитам, подстилается верхнекаменноугольными глинами и мергелями и имеет напорный характер. Третий водоносный горизонт залегает на глубинах 46,5-49,2 м (абсолютные отметки 101,06-102,84 м), его пьезометрические уровни составляют 39,5-44,7 м (абсолютные отметки 104,6-111,2 м), а величина его пьезометрического напора изменяется от 2,1 до 9,5 м.

3. Практически всеми буровыми скважинами на глубинах от 48,5 до 81,0 м в известняках и доломитах среднего отдела каменноугольной системы были вскрыты полости, заполненные рыхлым материалом и участки сильно разрушенного кавернозного известняка. На этих интервалах отмечались провалы бурового инструмента или ускорение проходки. Размер пустот по вертикали составляет 0,2-0,9 м, а высота закольматированных полостей и зон повышенной закарстованности изменяется от 0,5 до 5,5 м. Скважинами №№ 14, 15 и 16 были зафиксированы ярко выраженные отличия в строении верхней части каменноугольных отложений по сравнению с остальной территорией участка. По-видимому, это свидетельствует о присутствии здесь крупного погребенного карстового провала, сформировавшегося в среднем карбоне.

Результаты поиска погребенных карстовых оседаний и провалов. В период инженерных изысканий, выполненных в 1975 г., в пределах исследуемого участка поверхностных кар-

стовых проявлений не наблюдалось (рисунок 4.1). Это связано с тем, что провалы 1969 года были ликвидированы (засыпаны) вскоре после их образования.

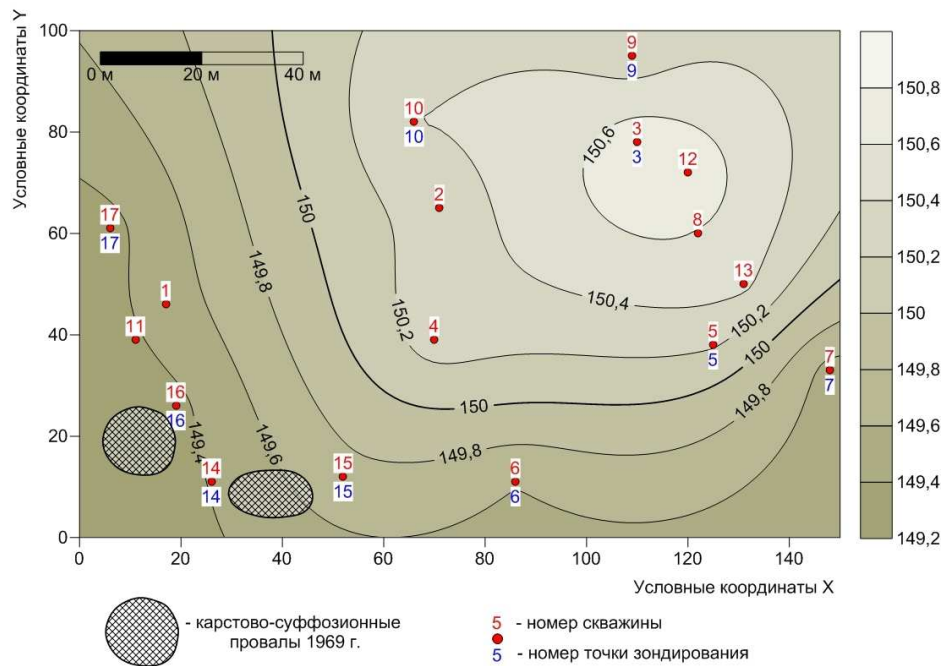


Рисунок 4.1. Карта рельефа земной поверхности на исследуемом участке по состоянию на 1975 г., построенная по абсолютным отметкам устьев скважин

Основным содержанием палегеоморфологического анализа, осуществляемого с целью поиска погребенных карстовых оседаний или провалов, как признаков потенциальной опасности, является обнаружение замкнутых понижений на некоторых маркирующих поверхностях (см. разделы 2.1 и 3.1). Для этого, на основе данных бурения, были построены карты следующих поверхностей, выступающих в роли маркирующих (рисунок 4.2): а) кровли верхнечетвертичных отложений; б) кровли верхнеюрских глин; в) кровли верхнекаменноугольных отложений. Анализ этих поверхностей выявил два участка, где присутствуют депрессии, которые можно идентифицировать как погребенные поверхностные карстопроявления. Первый участок находится в юго-западной части исследуемой территории, а второй расположен у ее северной границы.

Понижения в юго-западной части территории связаны с провалами 1969 года. Центр зоны этих понижений находится в районе скважины № 14 и прослеживается в кровлях верхнекаменноугольных и верхнеюрских отложений. Глубина депрессий составляет примерно 1,0-1,5 м относительно кровли карбона и около 0,5 м относительно кровли юрских глин. По кровле верхнечетвертичных песчаных отложений понижений в этом месте не прослеживается, однако депрессия на этой маркирующей поверхности наблюдается севернее, в районе скважин №№ 11 и 16. Вероятно, она связана с геологическими особенностями формирования естественной поверхности четвертичных отложений и ее дальнейшей искусственной перепланировкой.

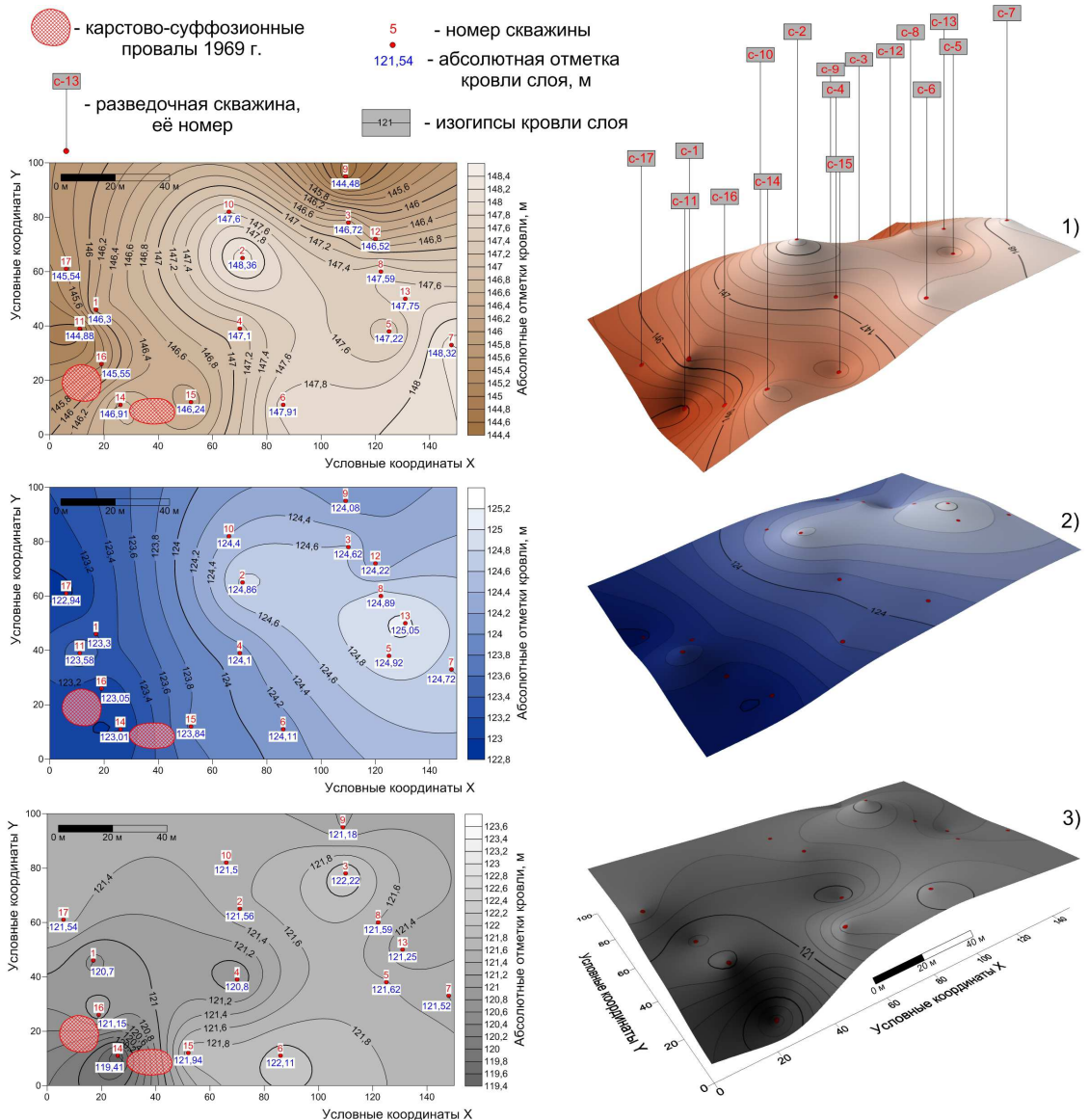


Рисунок 4.2. Конфигурация стратиграфических границ, принятых в качестве маркирующих поверхностей при поиске на исследуемом участке погребенных карстовых оседаний и провалов: 1) рельеф кровли верхнечетвертичных отложений; 2) рельеф кровли верхнеюрских отложений; 3) рельеф кровли верхнекаменноугольных отложений

Понижение кровли карбона у северной границы участка, в районе скважины № 9 прослеживается также и в вышележащих слоях – юрском водоупоре и четвертичных песках. Амплитуды понижений составляют: 0,6-0,8 м в кровле каменноугольных отложений, около 0,5 м по кровле юрских глин и примерно 1,5 м по кровле четвертичных песков.

Таким образом, в пределах исследуемого участка можно уверенно предположить присутствие двух погребенных дочетвертичных карстовых оседаний или провалов (рисунок 4.3). Одна из этих форм расположена в районе скважин №№ 14-16 и, по-видимому, представляет собой результат позднейшего «оживления», погребенного среднечетвертичного карстового провала. Вторая форма, не имеющая признаков унаследованности, находится в районе скважины № 9.

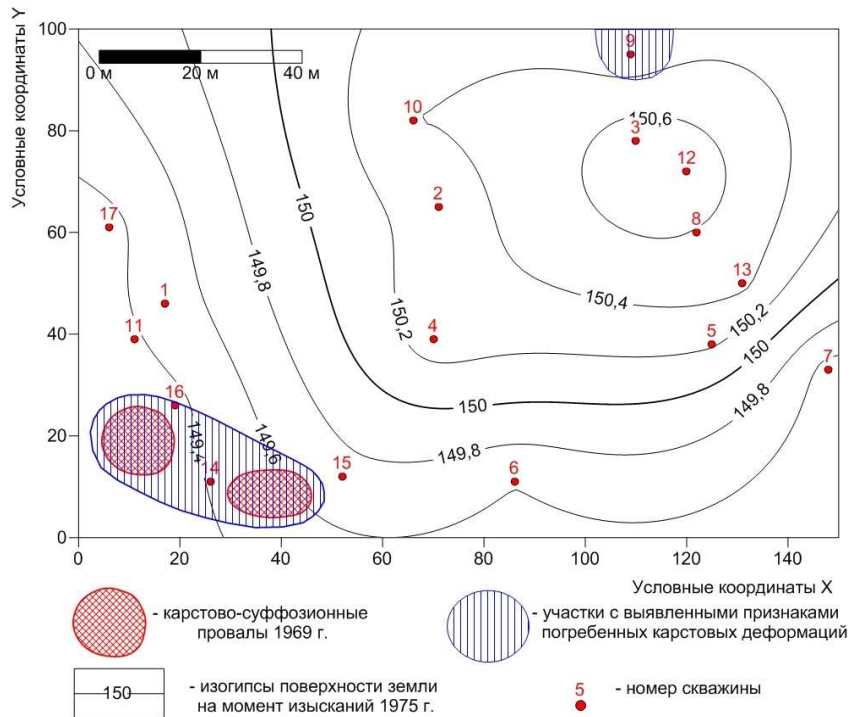


Рисунок 4.3. Результаты поиска в пределах исследуемого участка погребенных поверхностных карстопроявлений

Результаты поиска зон суффозионного выноса частиц несвязных пород в трещины и полости. Методика обнаружения зон с признаками суффозионного изменения гранулометрического состава несвязных грунтов покрывающей толщи в пределах исследуемого участка была описана в подразделе 3.2.3 настоящей работы. По результатам проведенного анализа на участке было выявлено несколько таких зон (рисунок 3.15): это районы скважин №№ 1, 7, 12, 14 и 16.

Результаты поиска «ослабленных» зон в грунтах покрывающей толщи. На исследуемом участке, помимо бурения скважин, было выполнено статическое зондирование в 10 точках. Его глубина составила 6,8-13,8 м. Для анализа показателей зондирования была выбрана толщина грунта в интервале глубин 3,8-10,8 м. Верхняя граница интервала определялась мощностью насыпных грунтов, не подлежащих оценке ввиду своей неоднородности, как по составу, так и по плотности сложения. Нижняя граница обусловлена минимальной глубиной статического зондирования. Точки, в которых глубина зондирования не укладывалась в указанный интервал, не были включены в обработку (исключением является точка № 10, где глубина зондирования составила 7,8 м, однако во избежание потери полезной информации, она не была отбракована).

При обработке данных статического зондирования диссертант применил метод послойного анализа исследуемой толщи [51]: интервал глубин от 3,8 до 10,8 м был разделен на равные метровые отрезки, что позволило изучить как всю толщу целиком, так и отдельно, по каждому слою. Такой подход позволяет:

- 1) определять местоположение ослабленных зон в плане;

- 2) определять условия распространения этих зон в грунтовой толще по глубине;
- 3) получить сравнительную оценку точек зондирования по содержанию в каждой из них ослабленных интервалов.

Для анализа использовались показатели лобового сопротивления грунта (q , МПа) при погружении в него конуса зонда. Аномально низкие (по сравнению с фоновыми) значения этого показателя воспринимались как свидетельство наличия в грунтовой толще «ослабленных» зон, то есть зон разупрочнения или разуплотнения грунта. По данным статического зондирования были построены карты распределения показателя среднего лобового сопротивления конусу (q), рассчитанного для всего интервала глубин 3,8-10,8 м (рисунок 4.4) и для каждого метрового интервала в отдельности (рисунок 4.5).

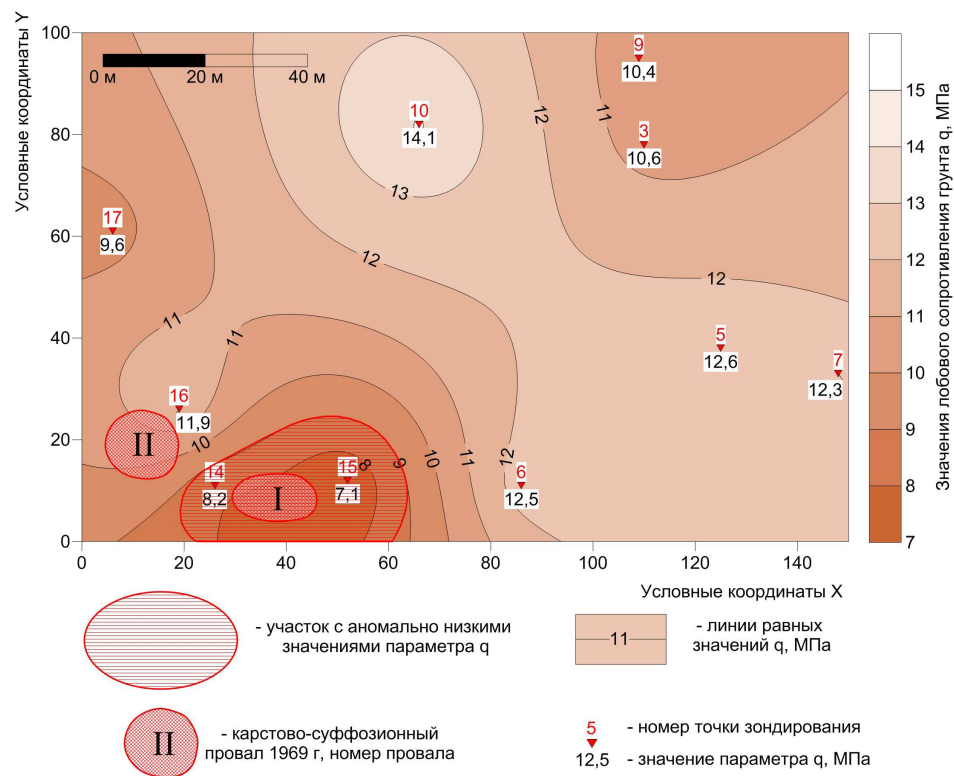


Рисунок 4.4. Карта-схема пространственного распределения в пределах исследуемого участка среднего лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песчаной толщи, рассчитанного для интервала глубин 3,8-10,8 м. Нумерация провалов условная

На рисунке 4.4 можно видеть, что показатели лобового сопротивления грунта распределены следующим образом: минимальные значения наблюдаются в юго-западной части исследуемой площадки, вблизи одного из карстово-суффозионных провалов 1969 года (первого), в районе точек зондирования №№ 14 и 15 (средние значения по интервалу 3,8-10,8 м: 8,2 и 7,1 МПа, соответственно). Примечательно, что северо-восточнее второго провала, снижение параметра q не столь выражено: его величина в районе точки зондирования № 16 равна 11,9 МПа, что примерно соответствует «фону». Это можно объяснить следующими причинами:

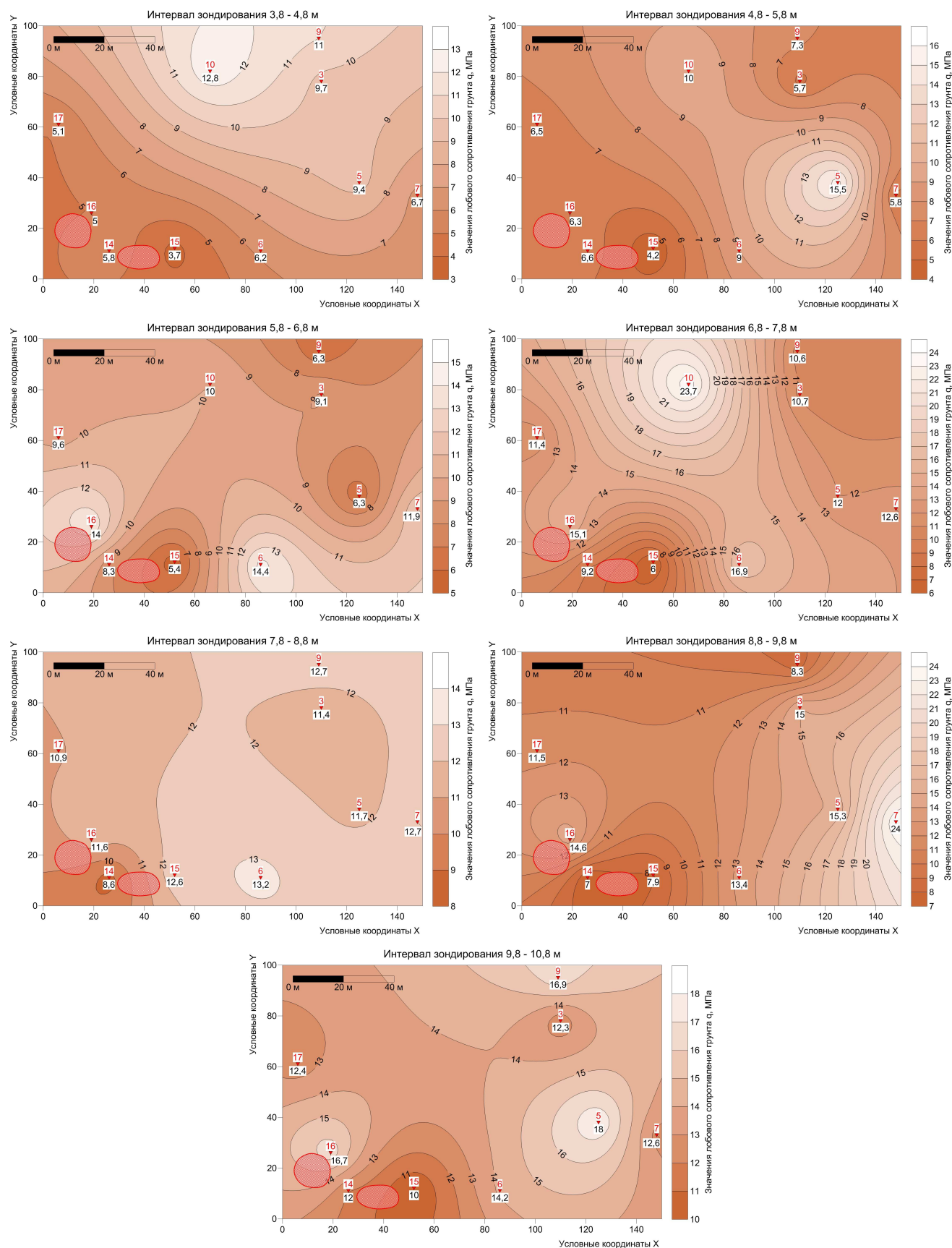


Рисунок 4.5. Карты-схемы пространственного распределения в пределах исследуемого участка среднего лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песчаной толщи, рассчитанного для слоев мощностью 1,0 м. Условные обозначения даны на рисунке 4.4

1) процессы, приводящие к снижению прочности и плотности песчаной толщи, вблизи точки зондирования № 16 не столь активны как в районе точек зондирования №№ 14 и 15;

2) грунт в точке № 16 с течением времени испытал уплотнение;

3) изначально, образовавшиеся в 1969 году провалы оказали меньшее влияние на участок к северо-востоку от второго провала (точка зондирования № 16), чем на участок между провалами (точка зондирования № 14) и к востоку от первого провала (точка зондирования № 15).

В каждом из выделенных слоев метровой мощности (рисунок 4.5) прослеживается аналогичная тенденция: минимальные значения параметров среднего лобового сопротивления грунта конусу отмечаются в точках статического зондирования №№ 14 и 15. Значения параметра q по каждому из выделенных слоев изменяются для точки зондирования № 14 в пределах от 5,8 до 12,0 МПа, для точки № 15 от 3,7 до 12,6 МПа. Минимальные «фоновые» значения по всему массиву грунта изменяются в диапазоне 5,0-12,3 МПа, максимальные – от 10,0 до 24,0 МПа. В отдельных слоях минимальные значения параметра q были отмечены в точках зондирования №№ 3, 5, 7, 9, 16 и 17.

Таблица 4.1. Сравнительная оценка результатов расчета среднего лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песчаной толщи для слоев мощностью 1,0 м с учетом пространственного распределения этого параметра (см. рисунок 4.5)

№№ ТЗ	Значение параметра лобового сопротивления (МПа) в пройденных интервалах зондирования Нз, м							Число "ослабленных" интервалов Нз	Отношение ослабленных Нз интервалов к пройденным Нз, %
	3,8-4,8	4,8-5,8	5,8-6,8	6,8-7,8	7,8-8,8	8,8-9,8	9,8-10,8		
3	9,7	5,7	9,1	10,7	11,4	15,0	12,3	1	14,3
5	9,4	15,5	6,3	12,0	11,7	15,3	18,0	1	14,3
6	6,2	9,0	14,4	16,9	13,2	13,4	14,2	0	0
7	6,7	5,8	11,9	12,6	12,7	24,0	12,6	1	14,3
9	11,0	7,3	6,3	10,6	12,7	8,3	16,9	2	28,6
10	12,8	10,0	10,0	23,7	-	-	-	0	0
14	5,8	6,6	8,3	9,2	8,6	7,0	12,0	6	85,7
15	3,7	4,2	5,4	6,0	12,6	7,9	10,0	6	85,7
16	5,0	6,3	14,0	15,1	11,6	14,6	16,7	2	28,6
17	5,1	6,5	9,6	11,4	10,9	11,5	12,4	2	28,6



"ослабленный" интервал

Сравнительная оценка данных статического зондирования при их послойной интерпретации осуществлялась следующим образом. В ходе аналитического изучения карт-схем, представленных на рисунке 4.5, в каждом из выделенных метровых интервалов (слоев) были отме-

чены точки статического зондирования с минимальными значениями показателей среднего лобового сопротивления грунта конусу (q). Далее, для каждой точки статического зондирования было вычислено процентное отношение числа «ослабленных» интервалов N_o , то есть слоев с аномально низкими значениями параметра q , к общему числу выделенных интервалов N_z , в данном случае равному 7 (таблица 1). По полученным значениям была составлена карта (рисунок 4.6), наглядно отображающая в виде круговых диаграмм искомое отношение N_o/N_z в каждой точке статического зондирования. Наиболее высокие значения N_o/N_z были отмечены в точках зондирования №№ 14 и 15 и составили 85,7% (в 6 из 7 выделенных метровых слоев были отмечены аномально низкие, по сравнению с фоновыми, средние значения лобового сопротивления грунта конусу (q)).

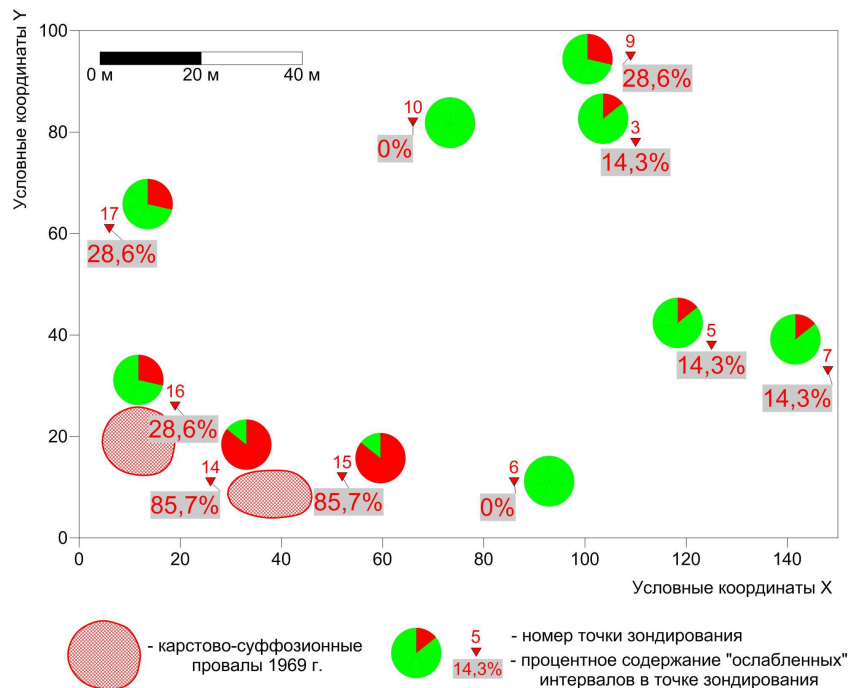


Рисунок 4.6. Результаты поиска в пределах исследуемого участка «ослабленных» зон в грунтах покрывающей толщи: выделение «ослабленных» интервалов статического зондирования

Таким образом, анализ данных статического зондирования, проведенный на исследуемом участке, позволил выявить в покрывающих породах так называемые ослабленные зоны, появление которых обусловлено реализацией или подготовкой карстового провалообразования. Наиболее ярко это проявилось в районе точек №№ 14 и 15, где «ослабление» прослеживается почти по всему интервалу глубин статического зондирования песчаных пород (3,8-10,8 м) и где находится один из карстовых провалов, образовавшихся в 1969 г. То же самое, но в меньшей степени, наблюдается в точках №№ 9, 16 и 17, а также в точках №№ 3, 5 и 7.

Для определения контура «ослабленной» зоны необходимо определить, какие значения параметра q следует считать аномально низкими для данного массива грунта. Разумеется, совершенно четкую границу провести невозможно, так как параметры грунтового массива изме-

няются не дискретно, а постепенно, поэтому контур может быть определен довольно условно. Средние значения показателей лобового сопротивления грунта в пределах исследуемого массива изменяются от 7,1 до 14,1 МПа. В точках зондирования №№ 14 и 15 эти показатели, как уже было сказано выше, составляют 8,2 и 7,1 МПа соответственно. Если сопоставить показатели в этих точках со средними по площадке, то логично принять значения ниже 9 МПа как аномально низкие при данных геологических условиях. Таким образом, примерную границу «ослабленной» зоны можно провести по изолинии, соответствующей величине среднего лобового сопротивления грунта конусу зонда, равной 9 МПа (рисунок 4.4).

Синтез результатов поиска признаков подготовки карстового провалообразования.

Анализ результатов буровых работ, определения гранулометрического состава песчаных грунтов и статического зондирования, выполненных в ходе инженерно-геологических изысканий 1975 года, позволил обнаружить на исследуемом участке:

- наличие погребенных поверхностных карстопоявлений (скважины и точки статического зондирования №№ 9, 14 и 16);
- суффозионные изменения гранулометрического состава песчаных грунтов (скважины №№ 1, 12, 14 и 16);
- наличие «ослабленных» зон в пределах интервала глубин статического зондирования 3,8-10,8 м (точки статического зондирования №№ 14 и 15).

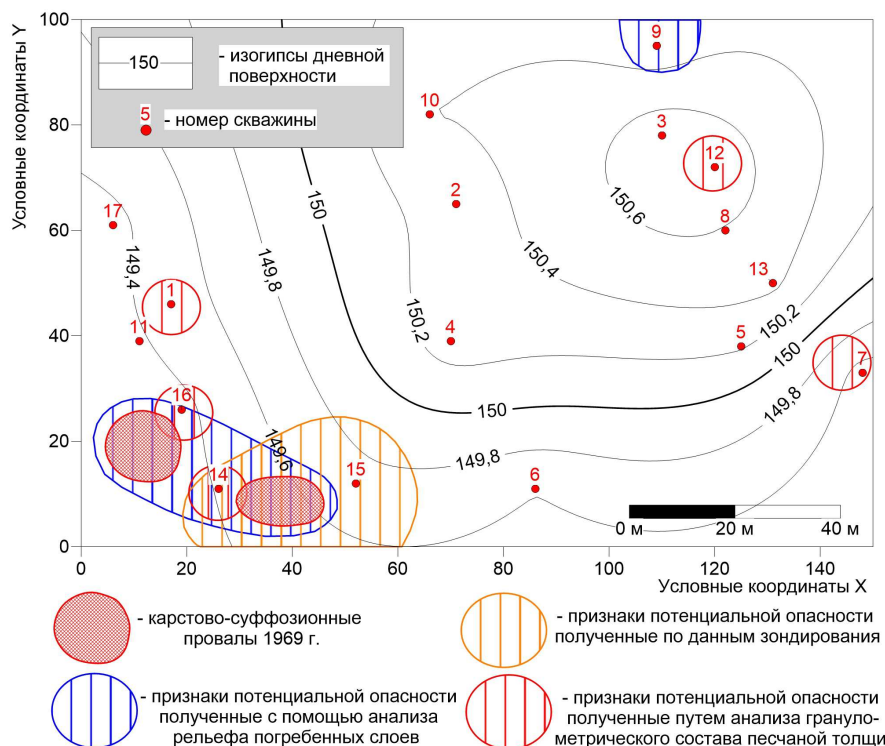


Рисунок 4.7. Синтетическая карта исследуемого участка с результатами поиска признаков подготовки карстового провалообразования.

В конечном итоге прогностическая информация концентрируется на синтетической карте (рисунок 4.7), которая объединяет все результаты поиска признаков подготовки карстового

провалообразования (рисунки 4.3, 3.15 и 4.6). На исследуемом участке в некоторых зонах отмечается наличие одного или двух таких признаков (скважины и точки статического зондирования №№ 1, 9, 11, 12, 15 и 16). Вблизи скважины №14 присутствуют все три признака возможного провалообразования.

Так как наличие того или иного признака в отдельности не позволяет в полной мере оценить карстоопасность территории, необходимы критерии для такой оценки. В данной методике предлагается использовать следующую градацию:

- при наличии на каком-либо участке территории всех трех признаков возможного образования карстового провала участок оценивается как **опасный**;
- при наличии одного или двух таких признаков – как **потенциально опасный**;
- при отсутствии признаков – как участок **без признаков подготовки карстового провалообразования**.

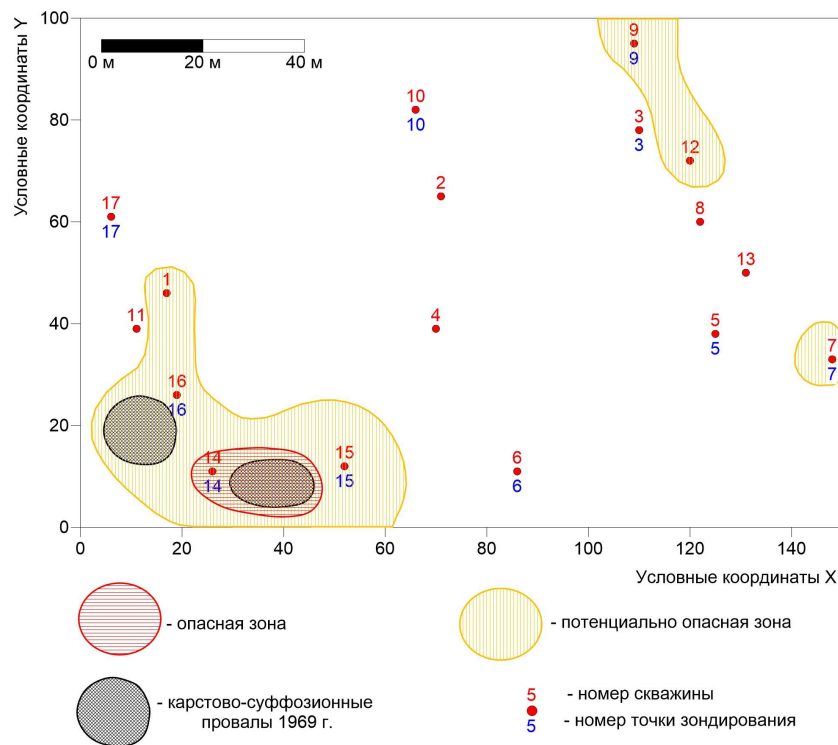


Рисунок 4.8. Прогнозная карта карстовой опасности (потенциальной возможности карстового провалообразования) на исследуемом участке.

Последний оценочный критерий требует пояснения. Дело в том, что говорить о безопасности участка с характерным для карстоопасных районов геологическим строением и гидрогеологическими условиями нельзя по той причине, что даже отсутствие вышеупомянутых признаков не дает основания для исключения образования карстового провала в принципе. Поэтому такие участки правильнее именовать участками без признаков подготовки карстового провалообразования, но не безопасными.

Итогом оценки территории является составленная с учетом указанных выше критериев опасности прогнозная карта потенциальной возможности карстового провалообразования (рисунок 4.8). Согласно прогнозу, выполненному для исследуемого участка, район скважины № 14 является **опасным** с точки зрения возможности образования карстового провала. Зоны вблизи скважин №№ 1, 15 и 16 на юго-западе участка и вблизи скважин №№ 9 и 12 на его северо-востоке характеризуются как **потенциально опасные**. На остальной части исследуемого участка признаки возможного карстового провалообразования не были выявлены. Необходимо отметить принципиальное различие между юго-западной и северо-восточной потенциально опасными зонами: в первой зоне карстовое провалообразование уже реализовалось, но может и повториться, а во второй это событие только подготавливается.

4.1.2. Верификация предлагаемых прогностических решений

Для оценки достоверности предлагаемых прогностических решений был составлен ретроспективный прогноз по материалам инженерно-геологических изысканий, выполненных в 1992 году в городе Дзержинске Нижегородской области на территории одного из промышленных предприятий. В состав исследований вошли испытания грунтов статическим зондированием в 12-ти точках и бурение 2-х неглубоких (до 20,0 м) скважин.

Пробуренные в пределах исследуемой площадки 20-ти метровые скважины вскрыли аллювиальные среднечетвертичные отложения (aQ_{II}), представленные, преимущественно, мелкими песками, с прослоями песков пылеватых и, реже, супесей. Согласно архивным данным, подошва этих пород залегает на глубине 45-46 м, а уровень безнапорных грунтовых надкарстовых вод – на глубине 22,0 м. Карстовые воды, отделенные от надкарстовых вод водоупором, сложенным верхнепермскими глинами (P_{2t}) мощностью 5-10 м, имеют напорный характер. Их пьезометрический уровень превышает уровень грунтовых вод на 2,6 м. Карстующиеся породы представлены разрушенными карбонатными породами верхней перми (P_{2kz}) и нижнепермскими сульфатными породами (P_{1s}).

Статическое зондирование выполнялось до «отказа», до различных глубин, максимальная из которых составила 12,8 м. Запись параметров зондирования во всех точках начиналась с глубины 1,5 м, что связано с наличием техногенных грунтов, сопротивление которых конусу не определялось. Во всех точках статическое зондирование достигало глубины 6,5 м, за исключением точки № 9, где его глубина составила 4,5 м, поэтому для анализа данных интервал глубин был принят равным 1,5-6,5 м.

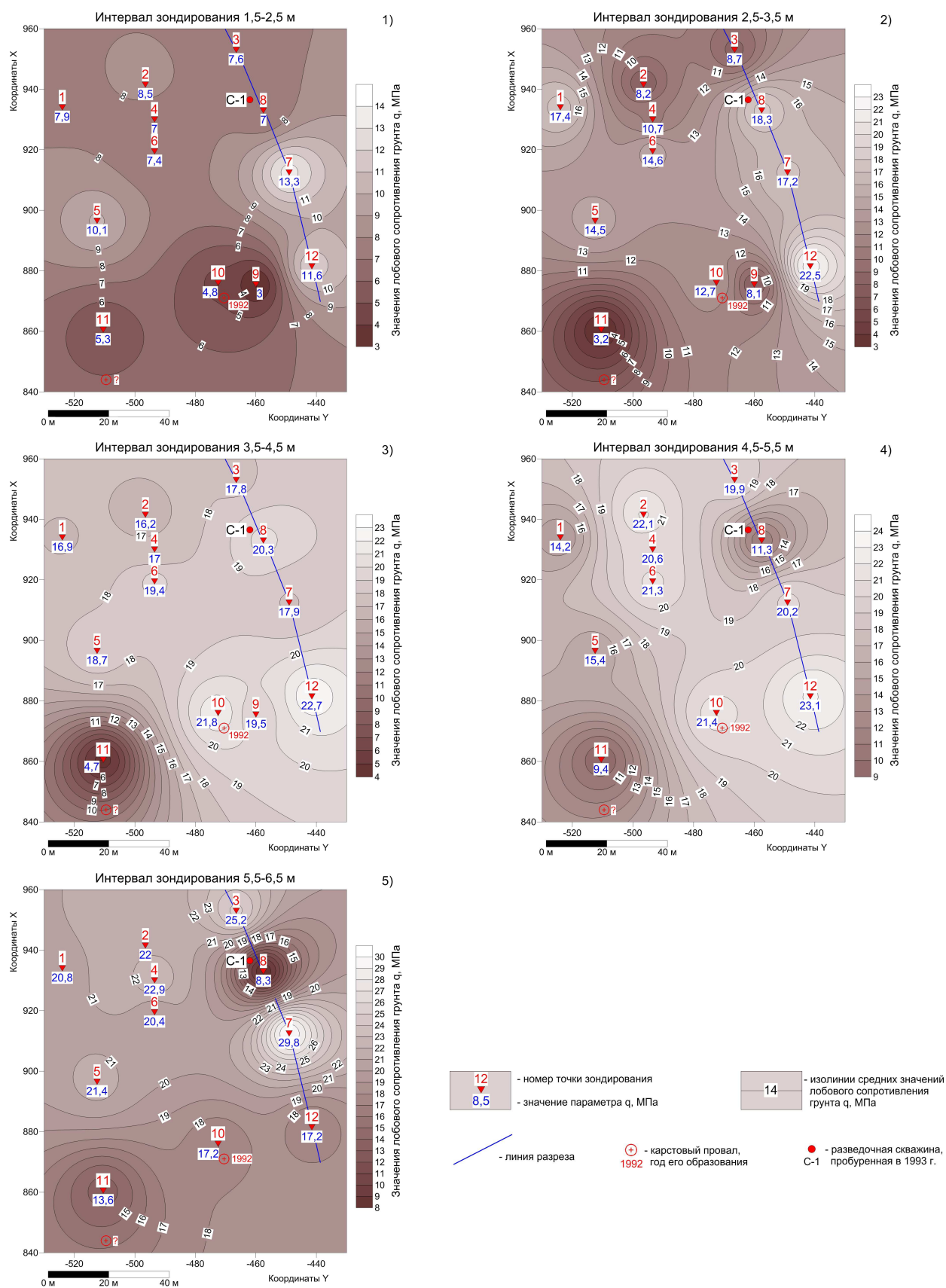


Рисунок 4.9. Карты пространственного распределения в пределах исследуемой площадки среднего лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песчаной толщи, рассчитанного для слоев мощностью 1,0 м

Толща грунтов, залегающих в пределах выбранного интервала глубин, была разделена на метровые слои и для каждой точки статического зондирования были рассчитаны значения лобового сопротивления грунта зонду (q), осредненные по глубине 1 м. Для каждого слоя были построены соответствующие карты площадного распределения средних значений параметра q (рисунок 4.9). Была также построена карта распределения параметра q , рассчитанного для всей толщи в пределах выбранного интервала глубин (рисунок 4.10).

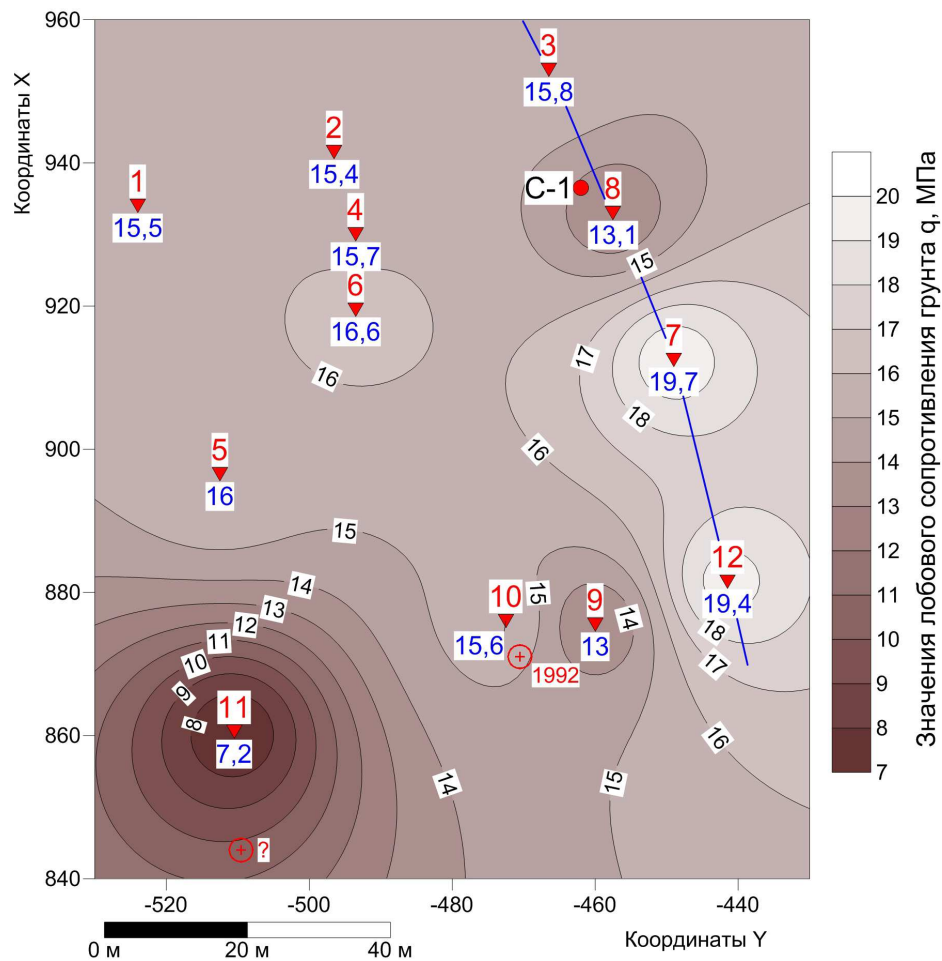
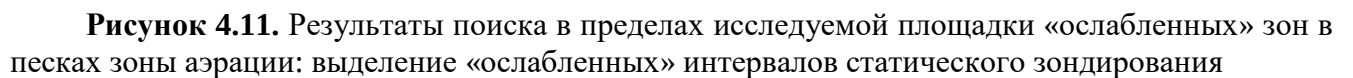


Рисунок 4.10. Карта пространственного распределения в пределах исследуемой площадки среднего лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песчаной толщи, рассчитанного для интервала глубин 1,5-6,5 м. Условные обозначения даны на рисунке 4.9

Подобные построения необходимы для выявления в толще грунтов «ослабленных» зон, которые являются признаком возможного провалообразования. Послойные построения дают возможность представить в объемном виде распределение показателей зондирования и, кроме того, получить полуколичественные показатели карстоопасности, выраженные в процентном содержании «ослабленных» интервалов, в исследуемой части толщи.

На исследуемой площадке выявлено несколько потенциально опасных зон, характеризующихся низкими показателями сопротивления грунта конусу, а именно, в районах точек статиче-



На поверхности земли в пределах площадки присутствуют две карстовые воронки. Первая воронка, время образования которой не установлено, расположена в юго-западной части площадки, в 20-ти метрах южнее точки зондирования № 11. Наличие сильного разупрочнения грунта в этой точке указывает на то, что карстовое провалообразование здесь явно может повториться. Вторая воронка, образовавшаяся в 1992 году (до начала изыскательских работ), расположена вблизи точек статического зондирования №№ 9 и 10, на расстоянии 5-10 м от них. Здесь, характер пространственного распределения лобового сопротивления грунта конусу показывает небольшое снижение значений параметра q , причем в верхней части исследуемого интервала глубин. Это говорит о том, что образовавшаяся воронка не оказывает большого влия-

ния на устойчивость покрывающей толщи, и появления нового карстового провала здесь по-видимому ожидать не следует.

Пространственное распределение лобового сопротивления грунта конусу в вертикальной плоскости (рисунок 4.12) свидетельствует о том, что на участке, где находится точка статического зондирования № 8, наблюдается картина, характерная для разупрочнения дисперсных пород над полостью (рисунок 2.29). Верхняя точка этой полости очевидно должна быть расположена ненамного глубже нижней границы исследуемого интервала (6,5 м).

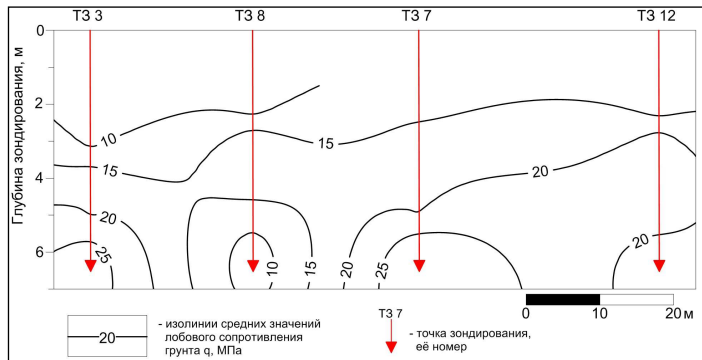


Рисунок 4.12. Распределение в вертикальной плоскости сглаженных значений лобового сопротивления конусу при статическом зондировании песков зоны аэрации на исследуемой площадке. Линия разреза показана на рисунках 4.9 и 4.10

В 1993 году в районе точки статического зондирования № 8 была пробурена разведочная скважина С-1, местоположение которой показано на рисунках 4.9, 4.10 и 4.11. Этой скважиной была вскрыта подземная полость в песках зоны аэрации, в интервале глубин 8,8-10,0 м. При этом, на земной поверхности, полость до сих пор никак себя не проявила, но вероятность образования здесь карстового провала в будущем очень велика.

Из всего вышеизложенного следуют два вывода:

1) наличие подземной полости на участке, который оценивается как потенциально опасный в отношении возможности карстового провалообразования, является доказательством достоверности предлагаемого прогностического решения;

2) предлагаемый метод локальной оценки карстовой опасности, включающий специальный анализ данных статического (равно как и динамического) зондирования, демонстрирует высокую эффективность даже в том случае, когда покрывающая толща опробована зондированием не на всю глубину.

4.2. Учет результатов прогноза при выборе противокарстовых мероприятий

Метод локальной оценки карстовой опасности, в основу которого положен поиск признаков подготовки карстового провалообразования, отражающихся в особенностях строения покрывающей толщи, раскрывает новые возможности в инженерно-геологическом обосновании

рационального выбора противокарстовых мероприятий. Рассмотрим эти возможности применительно к отдельным видам противокарстовой защиты (таблица 4.2).

Таблица 4.2. 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 осадания и провалы	Суффизонное разуплотнение несвязных пород	Разупрочнение дисперсных пород над полостями
Планировочные	Расположение зданий и сооружений на менее опасных участках			
	Другие			
Водо-защитные	Ограничение объемов откачки подземных вод			
	Другие			
Противофильтрационные				
Геотехнические	Тампонирующее карстовых полостей и трещин			
	Опирающие 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				

Планировочные противокарстовые мероприятия, в частности, включают в себя «...расположение зданий и сооружений на менее опасных участках, как правило, за пределами участков категорий устойчивости I – II относительно интенсивности карстовых провалов..., а также за пределами участков с меньшей интенсивностью (частотой) образования провалов, но со средними их диаметрами больше 20 м...» [18]. На локальном уровне, когда речь идет об инженерно-геологических изысканиях для подготовки проектной документации, этот критерий, изложенный в процитированном пункте 8.3.2.1 СП 116.13330.2012, становится очень расплывчатым. На практике для решения этой проблемы можно воспользоваться подходом, основы которого были заложены еще самыми ранними методическими документами, регламентирующими инженерно-геологические изыскания [9] и проектирование зданий и сооружений [11] в карстовых районах СССР, и который наиболее четко сформулирован И.А. Саваренским и Н.А. Мироновым [69]. Согласно этому подходу, предлагается проводить границы между категориями устойчивости территории (в частности, между II и III) на определенных расстояниях от краев присутствующего поверхностного карстопроявления или от скважины, обнаружившей карстовую полость. При отсутствии в пределах площадки того и другого вопрос остается открытым, и его ненормативное решение связано с возможностью выделения каких-то карстоопасных зон, достаточно четко картируемых на локальном уровне, которых следует избегать при застройке территории.

Предлагаемый прогностический метод заметно расширяет такую возможность, поскольку он позволяет картировать в качестве потенциально опасных зон погребенные карстовые воронки (оседания и провалы), зоны суффозионного выноса частиц несвязных пород покрывающей толщи в карстовые трещины и полости, а также зоны разупрочнения дисперсных пород над карстовыми полостями. Любопытно отметить, что в нашей стране отсутствует нормативный запрет на строительство зданий и сооружений над погребенными и даже искусственно засыпанными карстовыми воронками. Вместе с тем, разрушение в 1992 году карстово-обвальным провалом «сложного» типа заводского корпуса в промышленной зоне г. Дзержинска Нижегородской области [79], построенного на трех старых засыпанных карстовых воронках, явно свидетельствует в пользу такого запрета.

Водозащитные и противифльтрационные противокарстовые мероприятия могут иметь профилактический характер и тогда они не требуют особого обоснования. Если же они применяются в оперативном порядке, то при этом следует быть уверенным в том, что они способны снизить или даже ликвидировать карстовую опасность, а не повысить ее или создать новые геологические риски. Это главным образом касается противифльтрационных мероприятий, реализация которых связана с активным воздействием на геологическую среду, способным

привести к различным негативным последствиям за счет барражного эффекта, что особо отмечается в СП 116.13330.2012 [18]. К этому следует добавить опасность активизации карстового провалообразования в результате ограничения объемов откачки подземных вод, что например наблюдалось в 80-х годах прошлого века в промышленной зоне г. Дзержинска Нижегородской области [77]. Обнаружение на площадке инженерных изысканий признаков подготовки карстового провалообразования в виде характерного изменения гранулометрического состава несвязных пород покрывающей толщи за счет суффозионного выноса их частиц в карстовые трещины и полости может послужить сильным аргументом в пользу оперативного применения водозащитных и противофильтрационных противокарстовых мероприятий.

Геотехнические противокарстовые мероприятия, как оказывающие активное воздействие на геологическую среду, должны применяться с известной осторожностью, что в первую очередь касается тампонирования карстовых полостей и трещин, когда эта мера используется не в гидротехническом, а в других видах строительства [73, 89]. Теперь это принципиальное положение можно уточнить, благодаря исследованиям, выполненным в рамках данной работы. Судя по всему, крайне нежелательным является производство работ по обеспечению опирания фундаментов на надежные незакарстованные грунты посредством забивных и даже буровых свай, если эта мера осуществляется над погребенным карстовым провалом или внутри зоны разупрочнения дисперсных пород покрывающей толщи над карстовой полостью. В результате забивки свай или бурения скважин может произойти «оживление» погребенного карстового провала или обрушение пород покрывающей толщи в карстовую полость с возможным выходом на земную поверхность.

Конструктивные и технологические противокарстовые мероприятия относятся к таким видам инженерной защиты, на выбор которых никак не могут повлиять результаты локальной оценки карстовой опасности, осуществляемой в соответствии с предлагаемой методикой. Связано это, однако, с разными причинами: параметры конструктивной противокарстовой защиты целиком зависят от диаметра ожидаемого провала, который не определяется с помощью предлагаемых прогностических решений, а технологические противокарстовые мероприятия не требуют особого обоснования.

Эксплуатационные противокарстовые мероприятия могут эффективно ориентироваться на результаты прогнозирования, выполненного в соответствии с предлагаемой методикой. Итоговая прогнозная карта может помочь в правильной организации мониторинга по большинству позиций, перечисленных в пункте 8.3.7.1 СП 116.13330.2012 [18]. Речь идет о выборе мест для: а) постоянного геодезического контроля за оседанием земной поверхности и деформациями зданий и сооружений; б) наблюдения за состоянием грунтов, уровнем и химическим составом подземных вод; в) периодического строительного обследования состояния

зданий, сооружений и их конструктивных элементов; г) установки систем автоматической сигнализации на случай появления недопустимых карстовых деформаций; д) устройства (и периодического наблюдения) глубинных марок, реперов и маяков на трещинах строительных конструкций. К сожалению, очень часто такой выбор осуществляется произвольно.

Провоцирующие противокарстовые мероприятия не рассматриваются действующими отечественными строительными нормами и до сих пор не находят в нашей стране должного применения, поскольку оно всегда связано с определенным риском. Дело в том, что «провокация» карстового провалообразования может быть успешной только тогда, когда будет полностью исчерпана потенциальная энергия этого процесса. В противном случае ситуация только ухудшится: провоцирующая мера не приведет к образованию провала, но сформирует полость обрушения в покрывающих породах, над которой впоследствии сможет образоваться провал, когда этого события никто не будет ожидать. Тем не менее, в зарубежной строительной практике известны случаи эффективного применения провоцирующих противокарстовых мероприятий двух типов, разумеется, реализуемых до начала строительства: длительного искусственного обводнения покрывающих пород [93] и приложение к ним динамических воздействий [99].

Прогностические решения, предложенные диссертантом, могли бы выступить в роли серьезного научного обоснования для применения таких мер. Присутствие на площадке будущего строительства закономерного изменения гранулометрического состава несвязных пород покрывающей толщи в связи с суффозионным выносом их частиц в карстовые трещины и полости явно указывает на эффективность искусственного обводнения грунтов в качестве мероприятия, провоцирующего карстово-суффозионное провалообразование. Использование в качестве «провокации» провалообразования динамических воздействий на грунты несомненно будет успешным в зоне разупрочнения дисперсных пород над карстовой полостью, чем кстати и объясняется упомянутая выше нежелательность обустройства в этих зонах свайных фундаментов в качестве геотехнических противокарстовых мероприятий. Очевидна также и эффективность использования обоих видов провоцирующих противокарстовых мероприятий над погребенными карстовыми провалами.

4.3. Выводы

1. Разработанная диссертантом методика локальной прогностической оценки карстовой опасности включает анализ результатов инженерно-геологических изысканий, выполненных в пределах конкретной территории, поиск на ней признаков подготовки карстового провалообразования, выделение и картирование зон проявления этих признаков, и составление на этой основе синтетической карты с отображением на ней всех выделенных зон. Заключительным эта-

пом локальной оценки карстовой опасности является составление прогнозной карты исследуемой территории с выделением опасных и (или) потенциально опасных зон с точки зрения возможности появления в них новых карстовых провалов.

2. Верификация результатов ретроспективного прогноза, осуществленного в соответствии с предлагаемой методикой на территории одного из промышленных предприятий г. Дзержинска Нижегородской области, продемонстрировала его высокую достоверность. Скважина, пробуренная в «ослабленной» зоне, выявленной при анализе данных статического зондирования, и идентифицированной как зона разупрочнения песчаных пород над карстовой полостью, действительно обнаружила эту полость в зоне аэрации.

3. Синтетическая карта территории с выделенными в ее пределах зонами проявления признаков подготовки карстового провалообразования может послужить хорошим инженерно-геологическим обоснованием выбора противокарстовых мероприятий. Это касается планировочных, водозащитных, геотехнических, эксплуатационных и провоцирующих мероприятий, хотя в нашей стране отсутствует широкий опыт применения последних. 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

Существуют признаки подготовки карстового провалообразования, которые в районах открытого 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 открытого карста (оседания и провалы), б) зоны суффозионного разуплотнения несвязных пород и в) зоны разупрочнения дисперсных пород над полостями.

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.

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.

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

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 литературы

А. Законодательные акты, государственные стандарты, нормативные и методические документы

1. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: ФГУП «СТАНДАРИНФОРМ», 2008. 18 с.
2. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: ФГУП «СТАНДАРИНФОРМ», 2013. 42 с.
3. Градостроительный кодекс Российской Федерации. М.: Омега-Л, 2005. 96 с.
4. Инструкция по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве. М.: НИИОСП, 2004. 107 с.
5. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М.: ГлавАПУ Мосгорисполкома, 1984. 14 с.
6. МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича, 2003. 41 с.
7. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83*). М.: Стройиздат, 1986. 391 с.
8. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02 - 84) / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
9. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР. М.: ПНИИИС, 1967. 91 с.
10. Рекомендации по использованию инженерно-геологической информации при выборе способов противокарстовой защиты. М.: Стройиздат, 1987. 80 с.
11. Рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах СССР. М.: ПНИИИС, 1967. 73 с.
12. Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области / Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области. Нижний Новгород: 2012. 140 с.
13. РСН 1-91. Инженерные изыскания для строительства. Нормы производства инженерных изысканий на закарстованных территориях. Уфа: Госстрой БССР, 1991. 38 с.
14. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: ПНИИИС, 1997. 44 с.

15. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ / Госстрой России. М.: ПНИИИС. 1997. 47 с.
16. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / Госстрой России. М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000. 91 с.
17. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: НОИЗ, 2012. 110 с.
18. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / Минрегион России. М.: НИИОСП им. Н.М. Герсегова. 2012. 60 с.
19. ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород: Администрация Нижегород. обл., 1999. 72 с.
20. ТСН 31-11-2005 Пк. Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Пермского края. Пермь: Администрация. 2005. 46 с.
21. ТСН 11-301-2004 По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях пермской области. Администрация Пермской области. Пермь. 2004. 122 с.
22. ТСН республики Башкортостан 302-50-95 РБ. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях/ Госстрой республики Башкортостан. Уфа: Госстрой БССР, 1996. 40 с.

Б. Опубликованная литература

23. Адерхолд Г. Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Перевод с нем. Толмачев В.В. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. 112 с.
24. Аникеев А.В. О двух формах разрушения связных грунтов над полостью // Геоэкология. 1993. №2. С 115-123.
25. Аникеев А.В. Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. 2006. № 6. С. 544-553.
26. Аникеев А.В. Изучение карстово-суффозионных провалов на моделях из термопластических материалов // Геоэкология. 2008. № 4. С. 1-17.
27. Аникеев А.В., Калинин Э.В., Тараканов С.И. Определение напряженного состояния грунтовой толщи над карстовой полостью // Инж. геология. 1991. № 5. С. 64-70.

28. Аникеев А.В., Леоненко М.В. Прогноз провалообразования при изменении гидродинамического режима на примере Дзержинского карстового района // Геоэкология. 2013. № 2. С. 130-146.
29. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии. М.: ИД КДУ, 2015. 296 с.
30. Бочков Н.М. Механическая суффозия грунта. М.: ОНТИ, 1936. 46 с.
31. Геология СССР. Башкирская АССР и Оренбургская область Том XIII. Часть I. М.: Недра, 1964. 655 с.
32. Гайдин А.М. Прогнозирование карстовых провалов в зонах влияния водопонижения // Инженерная геология. 1987. №3. С 76-79.
33. Гвоздецкий Н.А. Проблемы изучения карста и практика. М.: Мысль, 1972. 391 с.
34. Дмитриев В.В., Ярг Л.А. Методы и качество лабораторного изучения грунтов. М.: КДУ, 2008. 542 с.
35. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск: Изд-во РАН, 1992. 143 с.
36. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Теоретические основы изучения парагенезиса карст-подтопление. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1998. 204 с.
37. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстование. Ч.I. Общее карстование. Пермь: Изд-во Перм. ун-та., 2004. 308 с.
38. Земской Г.В., Алешина Л.А. Структурные признаки образования карстовой формы рельефа // Инженерные изыскания в XXI веке. Материалы научно-производственной конференции. ФГУП ПНИИИС Госстроя России. Москва. 2003. С.11-13.
39. Зеркаль О.В., Самарин Е.Н.Б Аверин И.В. Использование статического зондирования для оценки развития карстово-суффозионных процессов // Экологическая безопасность строительства в карстовых районах: материалы международного симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. С. 92-96.
40. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. М.: Госстройиздат, 1957. 295 с.
41. Истомина В.С., Буренкова В.В., Мишурова Г.В. Фильтрационная прочность глинистых грунтов. М.: Стройиздат, 1975. 220 с.
42. Карта распространения закарстованных пород и карстовых явлений Европейской части СССР, Урала и Кавказа. Масштаб 1 : 2500000 / Сост. Н.В. Родионов и др. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 4 л.

43. Кондратьев В.Н. Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах. Симферополь: Крымиздат, 1958. 76 с.
44. Кочев А.Д., Экзарьян В.Н., Петрукович Л.В. и др. Методика применения экспертного анализа при изучении карстово-суффозионных процессов Москвы и ЛПЗП // Инж. геология. 1989. № 3. С. 82-90.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.

52. Крашенинников В.С. Формирование ослабленных зон над карстовой полостью (экспериментальное подтверждение) // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 42-45.

53. 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.

54. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 6-8.

55. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.

56. Кухарев Н.М. Инженерно-геологические изыскания в областях развития карста в целях строительства. М.: Стройиздат, 1975. 168 с.

57. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 479 с.

58. Лубочков Е.А. Несуффозионные несвязные грунты // Изв. ВНИИ гидротехники. 1962. Т. 71. С. 61-89.

59. Лыкошин А.Г. Вопросы изучения фильтрационных деформаций и неоднородности водопроницаемости горных пород // Тр. ин-та Гидропроект. 1976. Сб. 48. С. 61-72.

60. Максимович Г.А. Методы изучения карста. Уч. Зап. Перм. гос. ун-та, т. 10, вып. 2, 1956, 86 с.

61. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т.1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь, 1963. 445 с.

62. Мироненко В.А., Шесстак В.М. Основы гидромеханики. М.: Недра, 1974. 296 с.

63. Огоноченко В.Н., Расчет диаметра опасной карстовой полости // Инженерные изыскания в строительстве. Сер. 15. Вып. 5. М.: ЦИНИС, 1979. С. 18-19.

64. Ожиганов Д.Г. К вопросу об условиях образования древних свит западного склона Башкирского Урала. Уч. зап. БГПИ, вып. 3. Уфа. 1951.

65. Ожиганов Д.Г., Схема тектонического районирования территории Башкирской АССР и Оренбургской области // Материалы VI Всеуральского совещания по вопросам географии и охраны природы. Физико-географическое районирование. Уфа, 1961.

66. Патрашев А.Н. Напорное движение грунтового потока, сопровождающееся выносом мелких частиц грунта // Изв. НИИ гидротехники. 1938. Т. 22. С. 5-49.

67. Патрашев А.Н. Методика подбора гранулометрического состава обратных фильтров // Сборник трудов «Ленгипроречтранс», Л., 1957. С. 33-47.
68. Печеркин А.И., Закоптелов В.Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1982. 88 с.
69. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС Минстроя России, 1995. 167 с.
70. Славянов В.Н. Количественный прогноз и моделирование процессов суффозии // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: Тез. докл. Науч.-техн. семинара: Пермь, 29-30 нояб. 1979. Пермь, 1979. С. 13-15.
71. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 320 с.
72. Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Терминология карста. М.: Наука, 1991. 260 с.
73. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
74. Фадеев П.И. Методические рекомендации по изучению и использованию гранулометрии песчаных пород в инженерно-геологических целях. М.: Изд-во МГУ, 1974. С. 112 с.
75. Хоменко В.П. Суффозионные свойства водонасыщенных песков вблизи зоны карстово-суффозионных провалов // Реф. сб. Инженерные изыскания в строительстве. Серия 2. 1976. Выпуск 11 (52). С. 15-22.
76. Хоменко В.П. Опыт прогноза развития подземной суффозии // Реф. сб. Инженерные изыскания в строительстве. Серия 15. 1978. Выпуск 2 (67). С. 3-7.
77. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
78. Хоменко В.П. Карстово-обвальные провалы «простого» типа: полевые исследования // Инженерная геология. 2009. № 4. С 40-48.
79. Хоменко В.П. Карстово-обвальные провалы «сложного» типа: физическое моделирование // Инженерная геология. 2009. № 3. С 34-41.
80. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность строительства в карстовых районах: материалы международного симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. С. 50-60.
81. Хоменко В.П., Коломенский Е.Н. Влияние подземных полостей на состояние вышележащих дисперсных пород // Промышленное и гражданское строительство. 2000. № 8. С. 39-41.

82. Червинская О.П., Авезова К.Р., Хоменко В.П. Карстологическая интерпретация результатов электроразведки на площадке проектируемого промышленного предприятия // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 11. С. 16-17.
83. Чугаев Р.Р. Приближенный расчет устойчивости тела земляных плотин // Изв. НИИ гидротехники. 1936. Т. 18. С. 203-216.
84. Ярг Л.А., Хацкевич А.Н., Кувшинников В.М. Прогноз техногенного карстово-суффозионно-иллювиального процесса комплексом экспериментальных методов // Инженерная геология карста: Докл. междунар. симпозиума. Пермь, 6-8 июля 1992. Пермь, 1993. С. 98-107.
85. Chang K., Bassnet C. Delineation of sinkhole boundary using Dutch cone sounding // The engineering geology and hydrogeology of karst terranes: Proc. 6-th Multidiscipl. conf. on sinkholes and the eng. and environ. impacts of karst. Springfield, Mo., 6-9 Apr. 1997. Rotterdam, 1997. P. 305-311.
86. Dunn I.S., Anderson L.R., Kiefer F.W. Fundamentals of geotechnical analysis. N. Y.: John Wiley & Sons, 1980. 414 p.
87. Edmonds C.N. Karst and mining geohazards with particular reference to the Chalk outcrop, England. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Vol. 41. Part. 3. August 2008. P. 261-278.
88. Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G., Foster M. Geotechnical engineering of dams. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1382 p.
89. Gutiérrez F., Cooper A.H., Johnson K.S. Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazard in evaporite karst areas // Environmental Geology. 2008. Vol. 53. No. 5. P. 1007-1022.
90. Kaufmann O., Quinif Y. An application of cone penetration test and combined array 2D electrical resistivity tomography to delineate cover-collapse sinkhole prone areas // Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrogeology: Proc. 8-th Multidiscipl. conf. on sinkhole and the eng. and environ. Impacts of karst. Louisville, Ky., 1-4 Apr. 2001. Lisse, 2001. P. 359-364.
91. Khomenko V.P. Forecast of a collapse location: new approach // Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology. 2008. Vol. 41. Part 3. P. 393-401.
92. Khomenko, V.P., Aleshina L.A. Estimation of sinkhole danger at a one-building's site in Moscow, Russia // Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Proc. 11th Multidisciplinary conference. Tallahassee, Fla., 22-26 Sept. 2008. Geotechnical special publication No 183. Reston, Va.: ASCE, 2008. P. 269-277.
93. Lebegue Y. Problèmes poses par les cavité dans du calcaire karstique cache prés d'Orleans // Proc. IAEG Symp.. Hannover SA. 1973. P. T4D1-T4Db.
94. Lehmann H. Karst-Entwicklung in den Tropen. Umschau, 53, 1953, N 18.

95. Lehmann H. Das Kartphanomen in den verschiedenen Klimazonen. *Erdkunde*, 8, 1954, Hf. 2, Bonn.
96. Martel E.A. *Les abîmes*. Paris: Delagrave, 1894, 580 p.
97. Terzaghi K., Peck R.B. *Soil mechanics in engineering practice*. N.Y.: John Wiley & Sons, 1948. 566 p.
98. Tuckwell G., Grossey T., Owen S. & Stearns P. The use of microgravity to detect small distributed voids and low-density ground // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. Vol. 41. Part. 3. August 2008. P. 261-278.
99. Wagener F. von M., Day P.W. Construction on dolomite in South Africa // *Environmental Geology and Water Sciences*. 1986. Vol. 8. Nos 1/2. P. 83-89.
100. Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G. *Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Chichester: Springer / Praxis Publishing, 2005. 382 p.
101. Wissmann H. *Der Karst der humiden Heissen und Sommerheissen Gebiete Ostasiens*. *Erdkunde*. Bd. VIII, 1954, H. 2, Bonn.
102. 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.
103. Zisman E.D. Sinkhole size // *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. Proc. of the 9-th multidisciplinary conference. Sept. 6-10, 2003. Huntsville, Alabama, USA. Geotechnical special publication № 122. P. 131-137.
104. Zisman E.D. A Method of Quantifying Sinkhole Risk // *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. Proc. of the 11-th multidisciplinary conference. Sept. 22-26, 2008. Tallahassee, Florida, USA. Geotechnical special publication № 183. P. 278-287.
105. Zhou W., Beck B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications//*Environmental Geology*. 2008. Vol. 55. No 4. P. 837-851.

В. Фондовая литература

106. Заключение о карстоопасности площадки строительства жилого дома по адресу: г. Москва, Хорошевское шоссе, строение 38, корпус 10. Договор № 50-2013. ООО «Противокарстовая и береговая защита – инновационные технологии». Дзержинск, Нижегородской области, 2013.
107. Научно-технический отчет по теме: Мероприятия по предупреждению и борьбе с опасными для строительства инженерно-геологическими процессами и явлениями на территории г. Москвы (Изучение опасных для строительства инженерно-геологических и гидрогеоло-

гических процессов и явлений на территории г. Москвы, меры их предупреждения и борьбы с ними – второй этап исследований, район Хорошевского шоссе). В 2-х томах. ПНИИИС Госстроя СССР, Мосгоргеотрест ГлавАПУ г. Москвы. М., 1975.

108. Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях. «Жилой дом 2-й очереди строительства, корпуса 1-3 по адресу: Московская область, г. Красногорск, Павшинская пойма, застройка микрорайона «Спасский мост». ОАО МосЦТИСИЗ, договор № 3175-11 от 26.07.2011. М., 2011.

109. Технический отчет о проведении инженерных (инженерно-геологических и инженерно-экологических) изысканий на участке проектирования торгового центра «ИКЕА», расположенного в Кировском районе г. Уфы. ЗАО «ЗапУралТИСИЗ» по заказу ООО «ПИРОС», заказ №№ 21212, 21212-д. Отчет об инженерно-геологических изысканиях. Уфа, 2004.