

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ. ЧАСТЬ 2. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ПРОВАЛОВ В ПРИРОДЕ



Фото О.Б. Нещеткина

НЕЩЕТКИН О.Б.*

ООО Научно-производственный центр «КАРСТ», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия, karst@sinn.ru

Адрес: ул. Бутлерова, д. 3, г. Дзержинск Нижегородской области, 606000, Россия

НЕЩЕТКИН М.О.

ООО Научно-производственный центр «КАРСТ», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия, karst@sinn.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 20.03.2018 / Принята к публикации 21.03.2019 / Дата публикации 29.03.2019

© ООО «Геомаркетинг», 2019

Аннотация

Основными методами исследований карстовых провалов в природе являлись: морфометрический метод, раскопки провалов, зондирование и бурение в зонах провалов, изучение динамических особенностей провалов и явлений, сопровождающих провалобразование. Изучение морфологических параметров провалов позволило установить, что практически всегда облик провалов соответствует элементарным геометрическим формам: сводовидная — цилиндрическая — коническая — чашевидная — блюдцевидная. В том случае, когда покровные отложения представлены глинистыми грунтами, большинство карстовых провалов имеет сводовидную или цилиндрическую форму, для песчаных грунтов характерны конические и чашевидные формы. Раскопки карстовых провалов установили сводовидный характер обрушения грунтов в промежуточную полость при развитии провала на земной поверхности. Зондирование зон провалов выявило особенности разуплотнения грунтов в провале, также свидетельствующие о сводовидном обрушении грунтов в промежуточную полость. Буровыми работами в условиях карбонатного и сульфатного карста было установлено, что над карстовыми полостями развиваются промежуточные полости. В 2015 году авторам посчастливилось наблюдать последовательность развития провала на земной поверхности и выделить три стадии образования провала. Результаты исследований карстовых провалов в природных условиях и лабораторного моделирования механизма их образования хорошо согласуются и убедительно свидетельствуют о том, что разрушение покровных грунтов над карстовыми полостями начинается с формирования первичной промежуточной полости, поверхность которой описывается сводом естественного равновесия. Далее происходит последовательное обрушение свода этой первичной промежуточной полости и формирование промежуточной полости на меньшей глубине. Таким образом, промежуточная полость «продвигается» к земной поверхности. В начальную стадию формирования провала на земной поверхности появляются концентрические трещины и небольшое блюдцеобразное понижение, в основную стадию происходит образование сводовидного провала, в завершающую стадию происходит обрушение бортов провала с формированием впадины устойчивой формы.

Ключевые слова:

карстовый провал; механизм образования провала; морфометрические исследования; раскопки; зондирование; бурение зон провалов

Ссылка для цитирования:

Нещеткин О.Б., Нещеткин М.О., 2019. Механизм образования карстовых провалов. Часть 2. Исследования строения провалов в природе. Инженерная геология, Том XIV, № 1, с. 44–58, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-1-44-58>

SINKHOLE DEVELOPMENT MODEL. PART 2. INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF SINKHOLES IN NATURE

OLEG B. NESHCHETKIN*

Scientific Production Center "KARST" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Russia, karst@sinn.ru
Address: Bld. 3, Butlerova St., 606000, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, Russia

MAKSIM O. NESHCHETKIN

Scientific Production Center "KARST" LLC, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Russia, karst@sinn.ru

Original paper

Received 20 March 2018 / Accepted 21 March 2019 / Published 29 March 2019

© "Geomarketing" LLC, 2019

Abstract

The main methods of sinkhole research in nature were: the morphometric method, excavations of sinkholes, cone penetration test (CPT) and drilling in the sinkhole zones, the study of the kinematic and dynamic characteristics of the sinkholes and accompanying effects. The study of morphological features of the sinkhole parameters has allowed to establish, that almost everywhere the appearance of the sinkholes corresponds to the elementary geometric shapes: arched — cylindrical — conical — cupped — saucer-shaped. In the case where the covering deposits are represented by clayey soils, most of the karst sinkholes have an arched or cylindrical shape and conical and cupped forms are typical for sandy soils. Excavations of karst sinkholes have established the arch character of the collapse of soils in the intermediate cavity in the development of a sinkhole on the earth's surface. The CPT of the sinkhole zones revealed specific features of the soil decompaction in the sinkhole, which testify to the collapse of the soils into the intermediate cavity. Drilling operations in the conditions of carbonate and sulphate karst have established that the intermediate cavities develop over the karst cavities. In 2015, the authors were lucky to observe the sequence of the sinkhole development on the earth's surface and to distinguish three stages of the sinkhole formation. The results of karst sinkholes investigations in nature conditions and laboratory modeling of the mechanism of their formation are in good agreement and clearly indicate that the destruction of the cover soils over the karst cavities in the collapse of their roofs begins with the formation of a primary intermediate cavity the surface of which is described by an arch of natural equilibrium. Further, there is a successive collapse of the arch of this primary intermediate cavity and the formation of an intermediate cavity at a lower depth. Thus, the intermediate cavity "moves" to the earth's surface. In the initial stage of formation of a sinkhole on the earth's surface, concentric cracks appear and a small saucer-shaped lowering, the formation of an arch sinkhole occurs in the main stage, in the final stage there is a collapse and displacement of blocks of soil with formation of a depression of a steady state.

Key words:

sinkhole; sinkhole development model; morphometric studies; excavations; CPT; drilling; drilling of sinkholes

For citation:

Neshchetkin O.B, Neshchetkin M.O., 2019. Sinkhole development model. Part 2. Investigation of the structure of sinkholes in nature. Engineering Geology World, Vol. XIV, No. 1, pp. 44–58, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-1-44-58>

Введение

Целью исследований, изложенных в настоящей статье, являлось изучение особенностей строения зон провалов и состояния грунтов, затронутых провальным процессом. Основными методами исследований являлись: морфометрический метод, раскопки провалов, зондирование и бурение в зонах провалов, изучение динамических явлений, сопровождающих провалообразование.

Морфометрические особенности карстовых провалов

Карстовый провал, как яркое современное проявление карстового процесса на земной поверхности, всегда привлекал исследователей, однако полные морфометрические исследования с замером профилей, особенностей дна, ступеней на бортах и трещин вокруг провалов, как правило, редки, в малой степени опубликованы. Большинство опубликованных материалов о строении зон провалов и механизме провалообразования содержит некоторые сведения о морфомет-

рических особенностях провалов, редко — о явлениях, предшествующих или сопровождающих провалообразование, еще реже — о геологическом строении зон провалов по данным раскопок, зондирования, бурения [1–7, 11, 13, 14].

Исследования карстовых провалов в районах сульфатного и карбонатного покрытого карста в Нижегородской, Владимирской, Свердловской, Челябинской областях, в Пермском крае, в Ровенской и Донецкой областях (Украина) позволили установить, что практически везде облик провалов соответствует элементарным геометрическим формам: сводовидная — цилиндрическая — коническая (воронковидная) — усеченный конус (чашевидная) — блюдцевидная. В том случае, когда покровные отложения представлены глинистыми грунтами, большинство карстовых провалов имеет сводовидную или цилиндрическую форму, для песчаных грунтов характерны воронковидная и чашевидная форма. Редко наблюдаются провалы сложного облика (сочетание нескольких элементарных форм), осложненные ступенями и трещинами вокруг про-

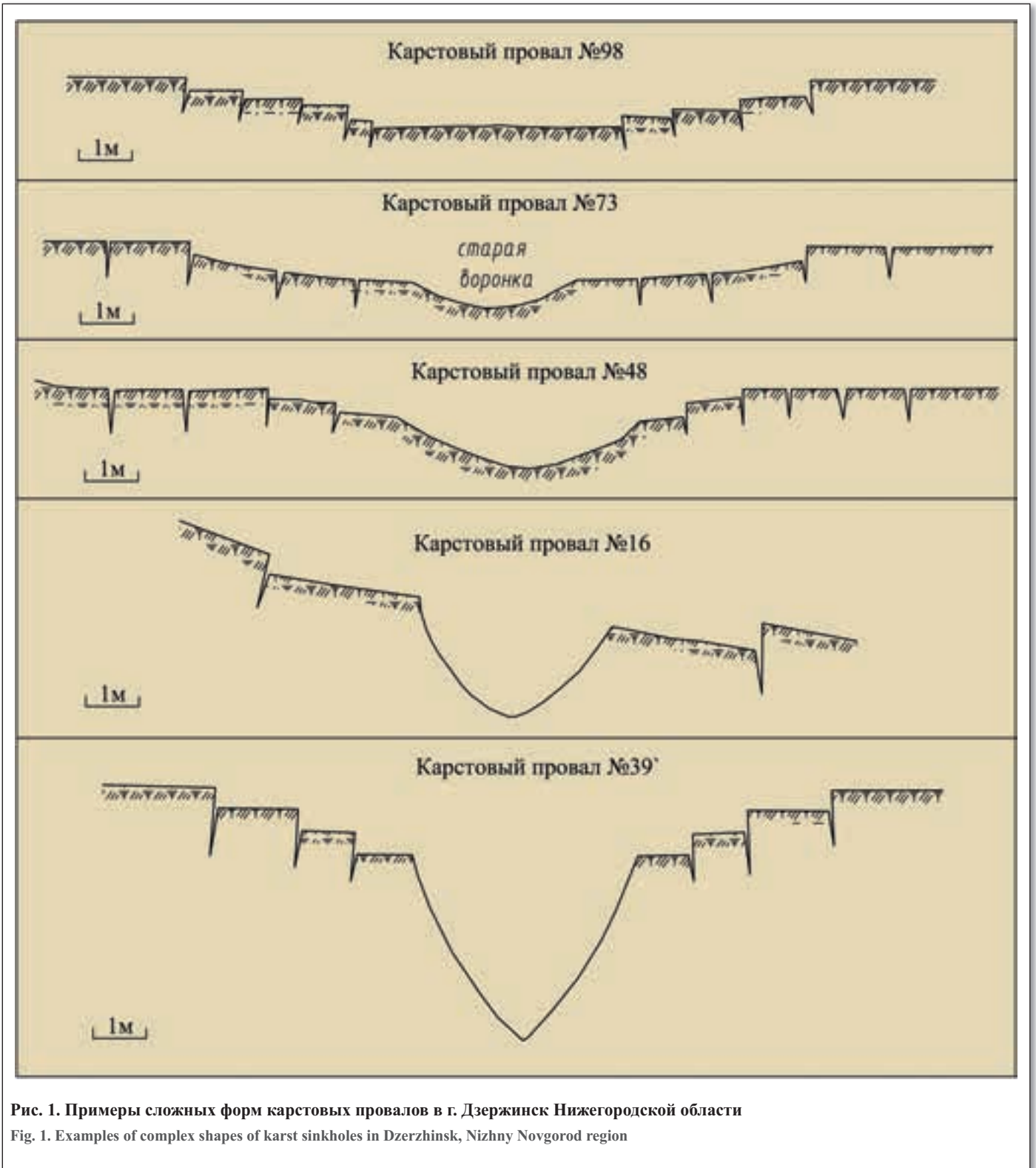


Рис. 1. Примеры сложных форм карстовых провалов в г. Дзержинск Нижегородской области

Fig. 1. Examples of complex shapes of karst sinkholes in Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region

вальной впадины, которые соответствуют зонам деформаций, уходящим в глубину (рис. 1).

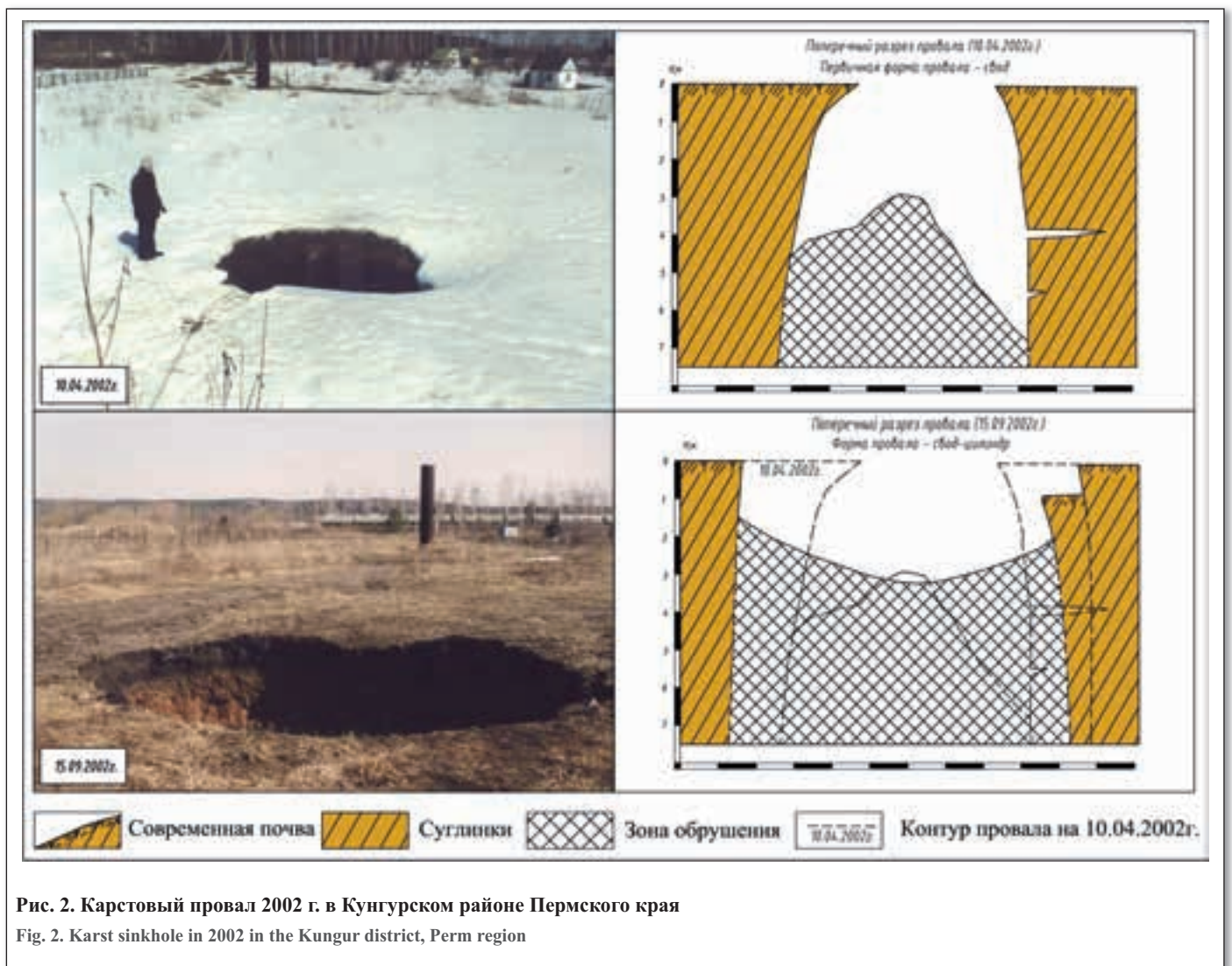
Карстовые провалы № 16 и № 39 (см. рис. 1) представляют собой сочетания конической воронки в центральной переуглубленной части провала и сводовидных деформаций бортов провала, при этом трещины вокруг центральной части провальной впадины имеют наклон, обращенный к центру провала, их кривизна и угол наклона менее 90° позволяют интерпретировать эти зоны как зоны сводовидных деформаций.

Для изучения взаимосвязи размеров провалов с их обликом проанализированы архивные данные о карсто-

вых провалах в районах г. Дзержинск Нижегородской области (преимущественно песчаные грунты) и г. Кунгур Пермского края (преимущественно глинистые грунты) [6]. В табл. 1 отобразено распределение форм провалов по интервалам параметра h/d , где h — глубина провала, d — диаметр провала. Статистическое распределение форм провалов свидетельствует о том, что первоначальной формой карстового провала является свод, а устойчивость такой формы во времени определяется сцеплением грунта и размером провала. В песках сводовидная форма провала неустойчива и развивается в цилиндрическую, воронковидную или чашевидную.

Таблица 1
Table 1
Статистическое распределение элементарных форм провалов
The statistical distribution of the sinkhole elementary geometric shapes

Район	Интервал h/d	Формы провалов и их статистическое распределение, д.ед.					
		свод	цилиндр	конус	чаша	блюдец	сложная
Дзержинск (песчаные грунты)	от 0 до 0,17	-	0,27	-	-	0,64	0,09
	от 0,18 до 0,23	-	0,11	-	0,89	-	-
	от 0,24 до 0,66	-	0,08	0,48	0,36	-	0,08
	свыше 0,66	0,04	-	0,96	-	-	-
	всего	0,01	0,12	0,36	0,31	0,16	0,04
Кунгур (глинистые грунты)	от 0 до 0,13	0,50	-	-	-	0,50	-
	от 0,20 до 0,50	0,53	0,08	0,14	0,19	-	0,06
	от 0,65 до 0,70	0,45	-	0,18	0,27	-	0,10
	от 0,77 до 0,84	0,27	0,45	-	0,10	-	0,18
	1,00	0,25	0,58	-	0,09	-	0,08
	свыше 1,00	0,91	-	-	-	-	0,09
всего	0,49	0,19	0,05	0,11	0,08	0,08	


Рис. 2. Карстовый провал 2002 г. в Кунгурском районе Пермского края
Fig. 2. Karst sinkhole in 2002 in the Kungur district, Perm region

Только режимными наблюдениями в районе г. Дзержинск Нижегородской области (далее г. Дзержинск) удалось зафиксировать неустойчивые сводовидные формы провалов в песках с диаметрами 1,3–2,2 м и глубиной

1,5–1,6 м. Один провал сводовидной формы (диаметр 2,5 м, глубина 1,1 м) был обнаружен при исследовании мелового карста Кузнецовского района Ровенской области (Украина). Среди зарегистрированных

Морфометрические характеристики провалов (г. Дзержинск)
Morphometric characteristics of sinkholes (Dzerzhinsk)

№ провалов	Размеры в плане, м	Глубина, м	Первоначальная форма, особенности
40	4,7 x 4,0	0,8	Цилиндр, дно вогнутое, глубина у бровки 0,5–0,6 м
83	13,0 x 12,5	2,5	Чаша (усеченный конус) с переуглублением в дне
91	11,0 x 10,0	3,7	Усеченный конус, дно с переуглублением
92	5,5	0,35	Блюдце, дно вогнутое, глубина у бровки 0,1 м
119	14,0 x 12,9	5,0	Чаша (усеченный конус)
120	14,9 x 13,6	3,0	Чаша
121	14,4 x 14,0	2,0	Чаша (усеченный конус) с переуглублением
127	3,9 x 3,8	1,0	Чаша
128	4,4 x 4,1	1,0	Чаша
129	5,1 x 4,7	1,9	Конус с переуглубленным дном
130	12,9 x 12,7	3,8	Конус (воронка с широким дном)
131	5,9 x 5,4	0,6	Блюдце, дно вогнутое
132	5,1 x 4,8	1,2	Усеченный конус, дно с переуглублением
133	4,0 x 3,4	1,3	Чаша с обрывистой бровкой до 0,5 м
134	7,2 x 7,1	4,1	Конус (воронка)
135	2,2 x 1,8	1,5	Свод
187	1,3	1,6	Свод

провалов в районе г. Дзержинск авторам известны лишь два провала цилиндрической формы с небольшими размерами (диаметр 2,0 м, глубина 1,0–1,2 м), а также несколько малоамплитудных провалов с вертикальными бортами.

В глинистых грунтах первоначальные сводовидные формы провалов более устойчивы и неоднократно фиксировались при карстологических исследованиях (рис. 2).

Детальное изучение морфологии карстовых провалов на участке режимных наблюдений в г. Дзержинск показало, что в схожих геолого-гидрогеологических условиях карстовые провалы характеризуются полным набором элементарных форм — от сводовидной до блюдцевидной с разнообразием диаметров и глубин (табл. 2).

В геологическом строении участка режимных наблюдений до глубины базиса развития карста принимают участие аллювиальные четвертичные отложения (45–46 м), отложения пермского возраста: терригенные отложения верхнего (татарского) отдела (10–11 м), разрушенные карбонатные породы казанского яруса среднего отдела (до 4 м) и сульфатные породы сакмарского яруса нижнего отдела пермской системы.

Ранее авторами было установлено, что в речных долинах глубина залегания «базиса развития карста» и расположения опасных карстовых полостей связана с историей геологического развития и формированием древней и современной эрозионной сети. Для района г. Дзержинск базисом развития карста является глубина гидратации ангидритов стерлитамакского горизонта сакмарского яруса нижнепермского возраста. Опасные карстовые полости приурочены к погребенным древним эрозионно-карстовым врезам и фиксируются буровыми работами как в казанских, так и в кровле сакмарских отложений.

Многообразие форм карстовых провалов на одном участке, в схожих условиях, особенности строения блюдцевидных провалов с вогнутым дном и переуглублениями в центре дна, особенности строения сложных форм провалов с многочисленными ступенями и трещинами, иногда отстоящими от провала на расстояния, соизмеримые с диаметром самого провала, особенности распределения форм провалов в песчаных и глинистых грунтах невозможно объяснить распространенной моделью сдвижения круглоцилиндрического столба грунта в карстовую полость.

Предлагаемая авторами модель механизма провалообразования [10] с формированием в покровных грунтах промежуточной полости сводовидной формы, а затем последовательным обрушением грунтов в промежуточную полость и продвижение этой промежуточной полости к дневной поверхности с развитием провала позволяет объяснить такое разнообразие провальных форм.

Строение провалов, установленное по результатам раскопок

Раскопки карстовых провалов на участке режимных наблюдений в г. Дзержинск позволили получить много новых данных о строении зон провалов и особенностях развития провала на земной поверхности (рис. 3, 4).

Строение верхней зоны провалов убедительно свидетельствует о последовательном сводовидном характере обрушения грунтов в промежуточную полость при развитии провала на земной поверхности.

Часто наблюдаемое переуглубление в дне провалов (см. рис. 4) связано с первоначальной фазой выхода провала на поверхность, в ряде случаев амплитуда смещения незначительна (первые сантиметры) и выражена сдвижением блока квазцилиндрической формы (очень крутого

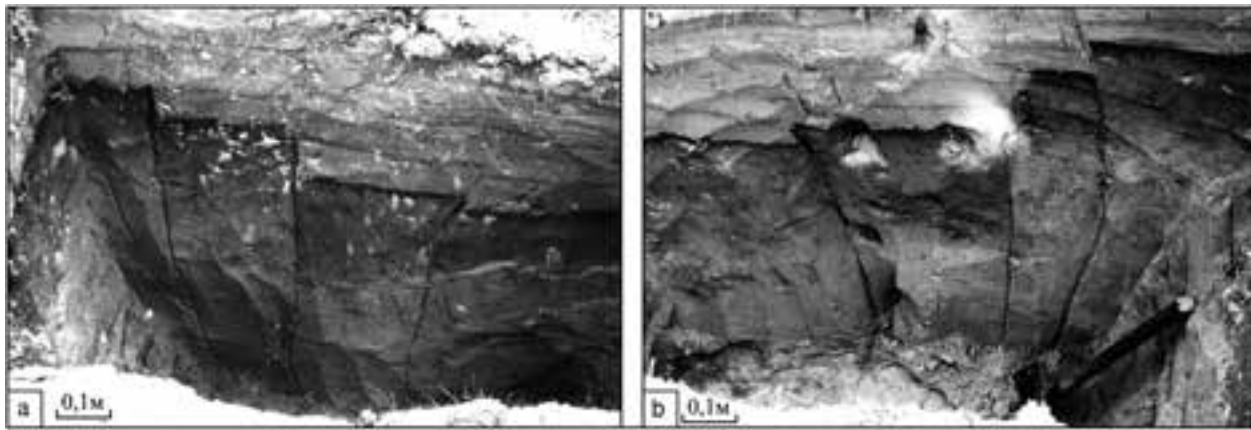


Рис. 3. Сводовидные деформации в провале № 131 в г. Дзержинск: а — западный борт шурфа, б — восточный борт шурфа

Fig. 3. The arched deformation in the sinkhole No. 131 in Dzerzhinsk: a — the west side of the pit, b — the east side of the pit

свода) без видимого разрыва сплошности грунтов в пределах этого блока.

Зоны деформаций фиксируются отчетливо не только по маркирующим горизонтам в природных грунтах (погребенная почва с включением углистого материала — продукты горения, изменение цвета), но и развитием по границам сдвижения корневой системы трав и кустарников на значительную глубину. Отмечается асимметрия зон деформаций и сложный характер их строения (см. рис. 4).

Можно отметить интересные редкие особенности строения карстовых впадин в других районах. Так в Ардатовском районе Нижегородской области обнаружены блюдцеобразные и чашеобразные понижения с диаметрами 1,5–10,0 м. Раскопки этих понижений (рис. 5) показали, что механизм их образования не провальный, а обусловлен локальным оседанием грунтов в результате длительного вымывания песков в трещиноватые мергели, глины и известняки верхнепермского возраста, залегающие на небольших глубинах в зоне сезонного колебания грунтовых вод (так называемые воронки просасывания). Некоторые локальные оседания находились в начальной стадии формирования, другие — существовали длительный период, что подтверждалось наличием погребенной почвы.

Строение провалов, установленное по результатам наблюдений в карьерах

Иногда в бортах карьеров можно наблюдать строение зон провалов в карстующихся породах. В разрушенных закарстованных доломитах (Арзамасский район Нижегородской области) выявлены зоны сводовидного обрушения кровли карстовых полостей (рис. 6).

В одном из карьеров Ровенской области (Украина), полностью вскрывшем меловую толщу, установлены древние карстовые зоны с разнообразными механизмами разрушений. В частности, выявлены древние (доолигоценные) провалы с характерным сводовидным обрушением меловых пород. Строение песчано-супесчаной толщи, перекрывающей карстовые провалы, свидетельствует о наличии процессов оседания за счет вымывания рыхлых покровных отложений вплоть до настоящего времени, что проявляется изгибом и увеличением мощности всех вышележащих грунтов.

Строение провалов, установленное по результатам зондирования

Зондирование зон провалов позволяет решить две задачи: определить особенности строения зоны деформации по изменению плотности грунтов и выявить зону разуплотнения грунтов вокруг провалов. Зондирование провала № 131 на участке режимных наблюдений в г. Дзержинск (рис. 7) выявило асимметричное расположение наиболее разуплотненной области в зоне провала с локальными остаточными полостями, зафиксированными по «провалу» зонда. Область разуплотнения в зоне провала имела ограниченные размеры в плане и по глубине, воронкообразный вид и асимметричное строение. Наблюдалось расширение области разуплотнения к дневной поверхности, что связано с особенностями выхода провала на земную поверхность.

При лабораторном моделировании механизма провалообразования [10] иногда наблюдались случаи, когда провал не развивался на дневной поверхности, а деформации затухали в толще покровных грунтов (рис. 8), что объяснялось небольшим объемом карстовых полостей и их полным заполнением разуплотненным материалом. В экспериментах (Э-30, Э-29, Э-26, Э-32) модельный материал, имитирующий влажные пески, представлен смесью алебаstra с сухим кварцевым песком. Ширина моделей составляет 50 см, высота 30 см (Э-30) и 60 см (Э-29, Э-26, Э-32), ширина полости 10 см (Э-30, Э-29), 20 см (Э-29), 40 см (Э-32).

Аналогичные случаи авторам удалось зафиксировать и в природных условиях, когда зондированием были обнаружены локальные сводовидные зоны разуплотненных грунтов (рис. 9) при отсутствии карстового провала на дневной поверхности. Эти зоны представляли собой не вышедшую на поверхность промежуточную полость, объем которой полностью заполнился разуплотненным грунтом.

Первоначально зона рыхлых грунтов (ИГЭ № 2в) была встречена скважиной № 2, совмещенной с точкой зондирования глубиной 13,0 м и вскрывшей зону слабых грунтов на полную мощность. Для оконтуривания зоны слабых грунтов на расстоянии 2,0 м от скважины № 2 были выполнены дополнительные точки зондирования № 2/2 и № 2/3 глубиной 13,0 м. В результате было установлено, что рыхлые грунты не имеют распространения далее

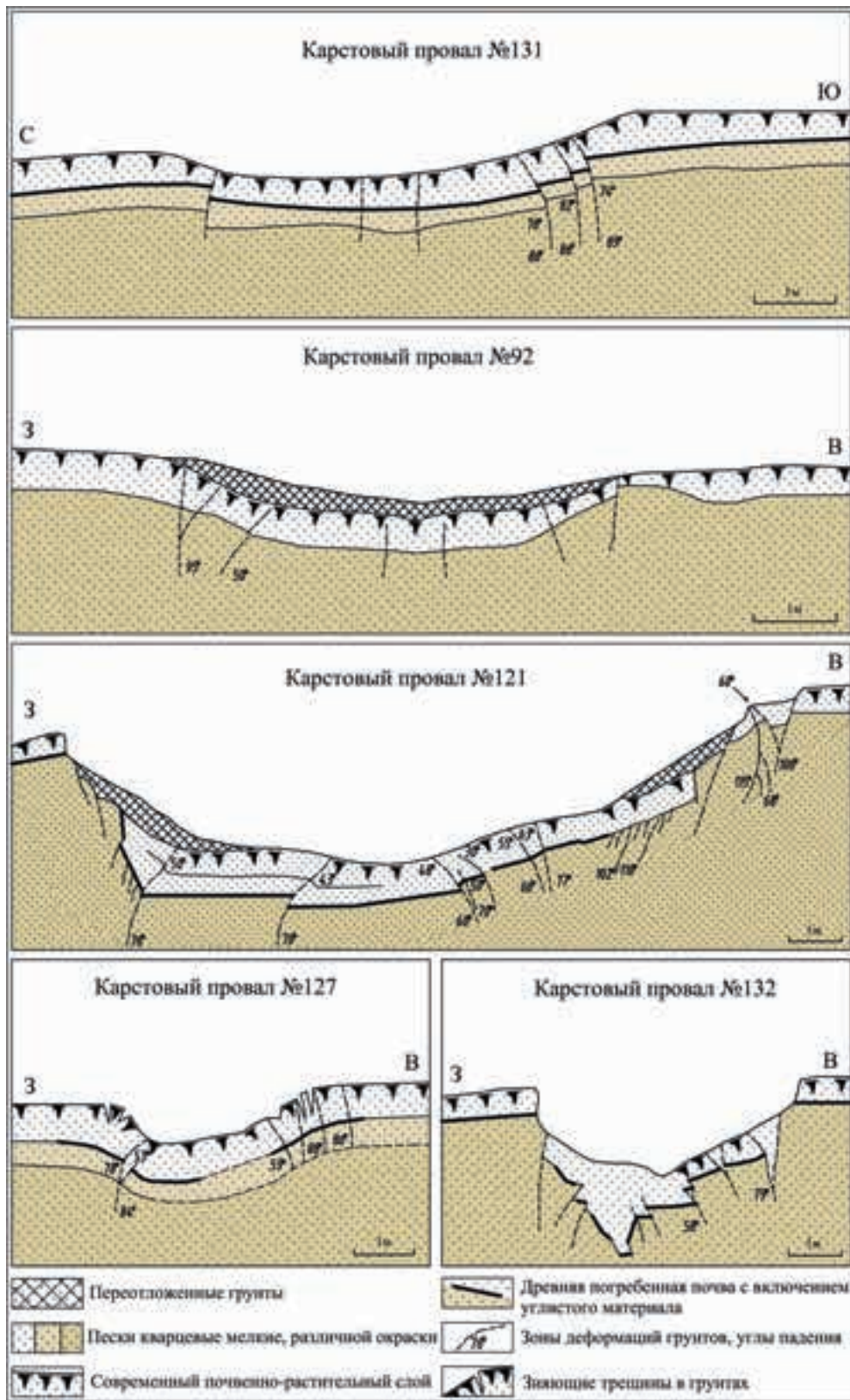


Рис. 4. Строение провалов по результатам раскопок в г. Дзержинск

Fig. 4. The structure of sinkholes on the results of the excavations in Dzerzhinsk

2,0 м от скважины № 2, а также выявлены признаки разуплотнения выдержанного слоя ИГЭ № 2а1, встреченного скважинами № 1 и № 3. Подобное локальное вертикальное разуплотнение, которое прослеживается на глубину, по мнению авторов, является зоной деформаций грунтов над промежуточной полостью.

Следует отметить, что прослои рыхлых песков в районе исследований, формирование которых не связано с карстом, имеют иной характер залегания и, как правило, прослеживаются в виде горизонтальных и субгоризонтальных слоев и линз, залегающих по напластованию песчаных грунтов.



Рис. 5. Общий вид и строение локального оседания (Нижегородская область)

Fig. 5. General view and structure of the local settlement (Nizhny Novgorod region)



Рис. 6. Зоны провалов в среднепермских отложениях (Нижегородская область)

Fig. 6. The sinkhole zones in Middle Perm sediments (Nizhny Novgorod region)

Подобные вертикальные зоны разуплотнения грунтов встречаются крайне редко и являются единичными наблюдениями, т.к. незначительные размеры таких зон в плане обуславливают их случайное обнаружение, с 1991 г. авторы зафиксировали такие зоны всего несколько раз.

К редким наблюдениям можно отнести и публикацию [15] об обнаружении зондированием в покровных грунтах промежуточной полости сводовидной формы.

Результаты исследований зон провалов зондированием позволяют предположить, что пока промежуточная полость находится в условиях временной устойчивости, зона раз-

уплотнения вокруг нее практически не образуется. Как только начинается выход провала на земную поверхность, вокруг него развивается зона разуплотнения, что подтверждается и результатами лабораторного моделирования [10].

Строение провалов, установленное по результатам бурения

Буровыми работами промежуточные полости в покровных грунтах над карстовыми полостями и в зонах древнего провалообразования выявляются крайне редко [2–4, 14].

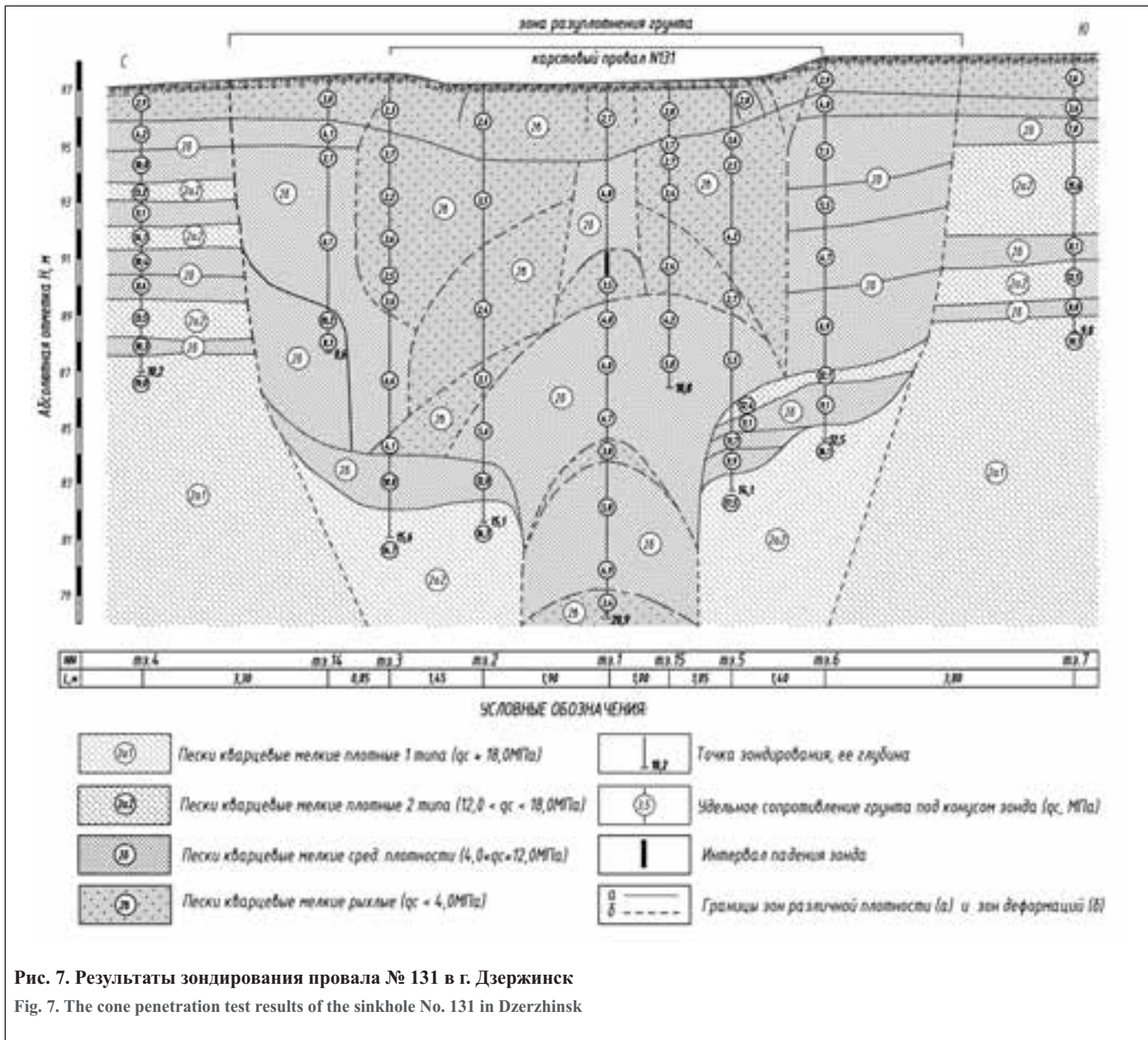


Рис. 7. Результаты зондирования провала № 131 в г. Дзержинск
 Fig. 7. The cone penetration test results of the sinkhole No. 131 in Dzerzhinsk

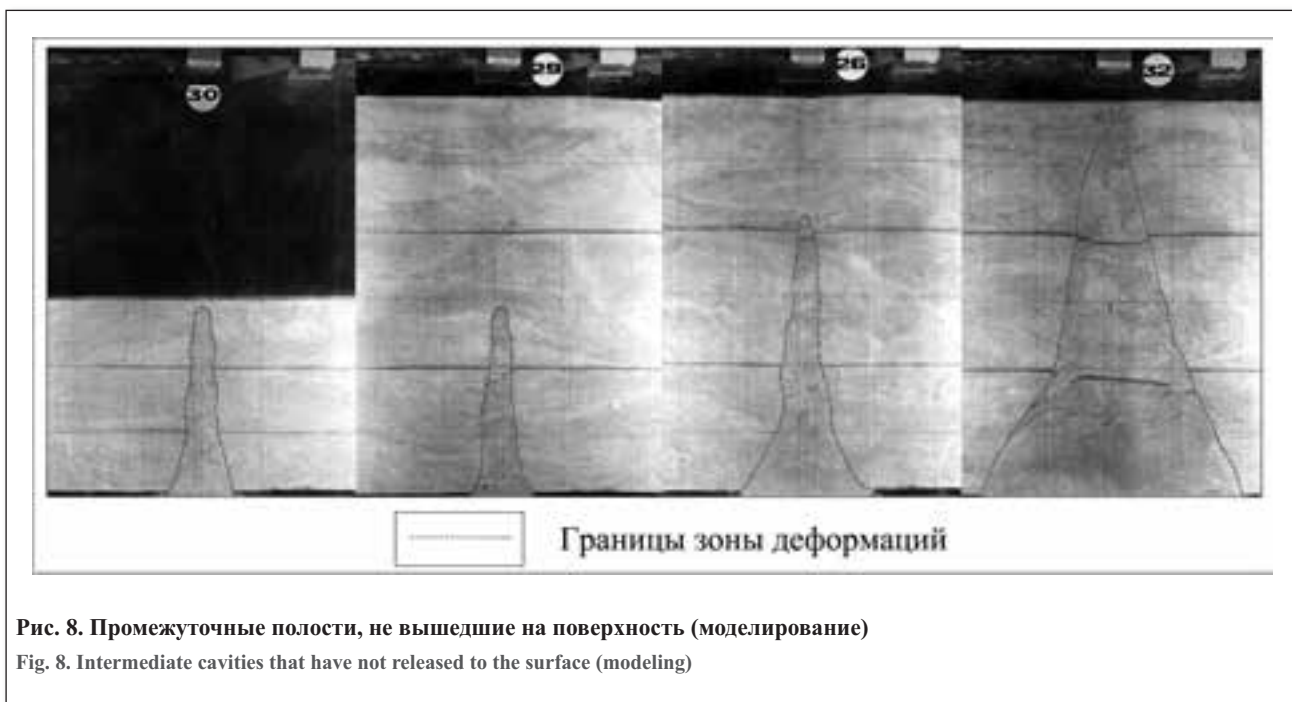


Рис. 8. Промежуточные полости, не вышедшие на поверхность (моделирование)
 Fig. 8. Intermediate cavities that have not released to the surface (modeling)

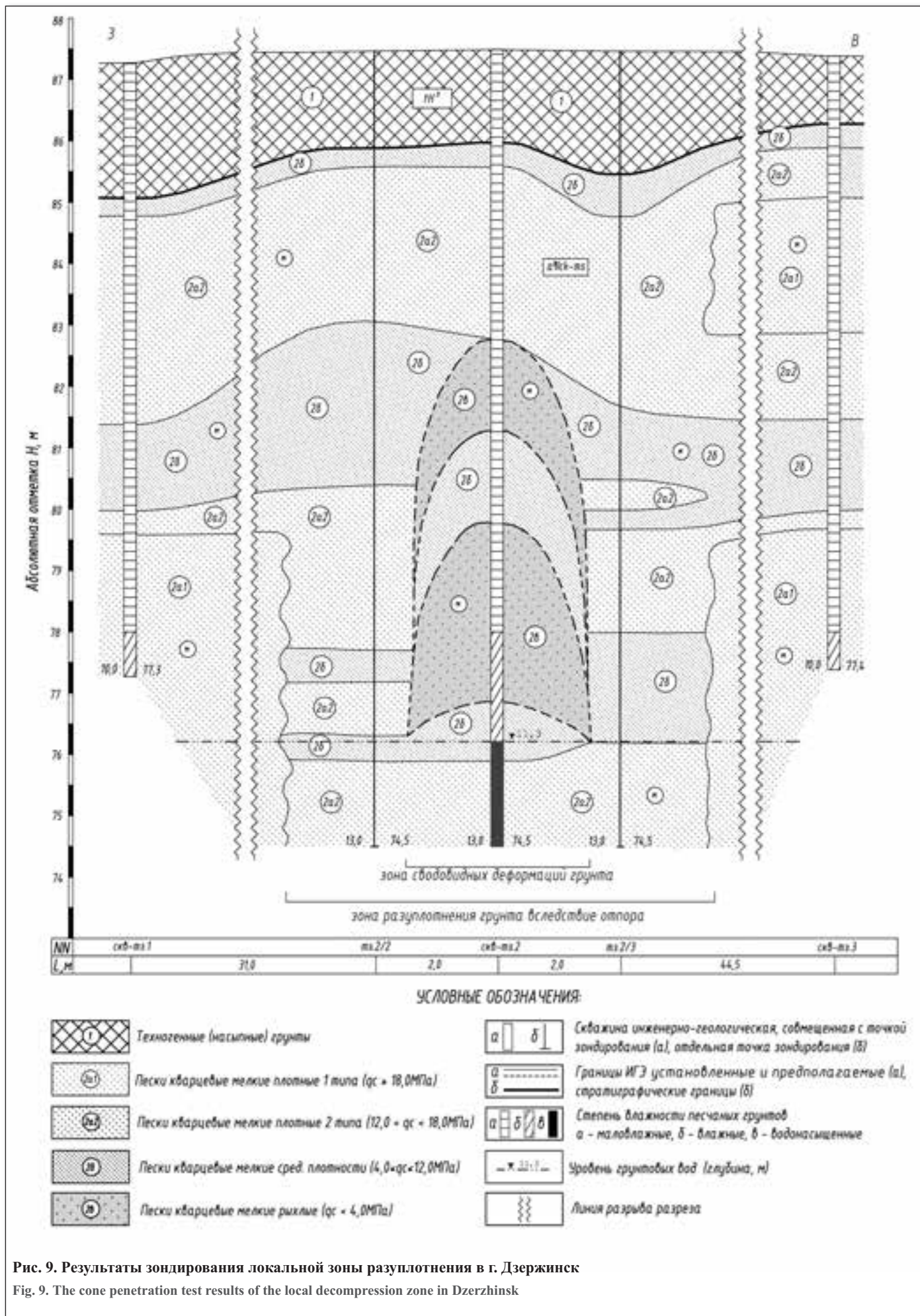


Рис. 9. Результаты зондирования локальной зоны разуплотнения в г. Дзержинск

Fig. 9. The cone penetration test results of the local decompression zone in Dzerzhinsk

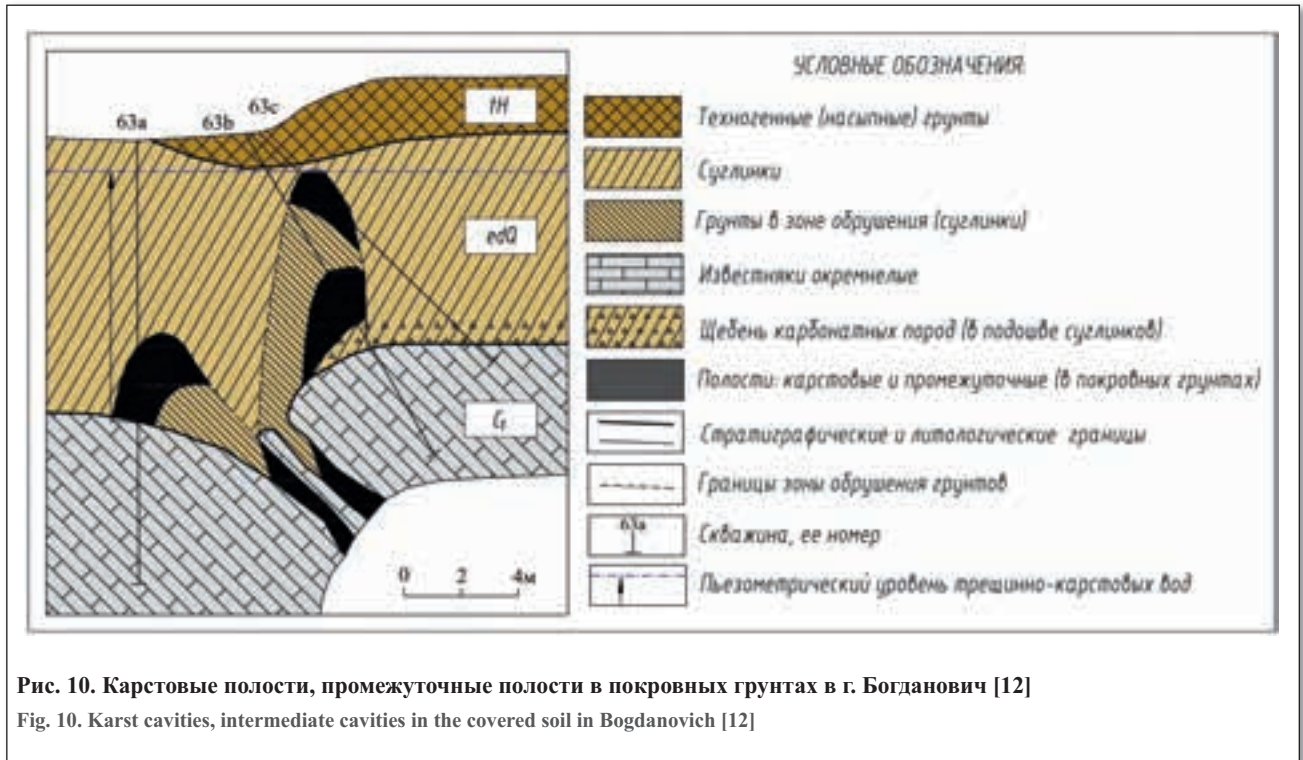


Рис. 10. Карстовые полости, промежуточные полости в покровных грунтах в г. Богданович [12]

Fig. 10. Karst cavities, intermediate cavities in the covered soil in Bogdanovich [12]

В условиях покрытого карбонатного карста (г. Богданович Свердловской области) при неглубоком залегании карстующихся пород было установлено [12], что карстовые полости развиваются вдоль трещин по напластованию пород, в которые вмываются покровные грунты, и формируются над этими трещинами промежуточные полости в покровных отложениях. На участке исследований подземные карстопроявления представлены: незаполненными полостями — 23%; полостями, заполненными покровными отложениями, — 36%; зонами разрушенных пород (щебень, дрова, мука) — 41%. Сброс промышленных стоков и эксплуатация трещинно-карстового водоносного горизонта вызвали размыв заполнителя древних карстовых полостей и образование полых форм, что привело к активизации провального процесса на участке исследований. Карстовый провал, произошедший на участке исследований в 2001 г., имел характерную для провалов в глинистых грунтах сводовидную форму. Заполненные и незаполненные карстовые полости были прослежены разведочным бурением нескольких десятков скважин, некоторыми из них удалось выявить промежуточные полости в покровных отложениях.

На рис. 10 приведен схематический геологический разрез, иллюстрирующий геологическое строение участка исследований, локализацию карстовых и промежуточных полостей в покровных отложениях.

В условиях покрытого сульфатного карста речных долин в Кунгурском районе Пермского края (далее Кунгурский район) бурением в зоне древней погребенной карстовой котловины установлено [8], что провалы приурочены к локальному эрозионному врезу в сульфатных породах, над которым зафиксированы промежуточные полости и зоны древних сводовидных деформаций (рис. 11).

Динамические особенности провалообразования

Процесс развития карстового провала на земной поверхности от начала деформации земной поверхности до формирования впадины устойчивой формы протекает в

несколько стадий, которые отражены в литературе [1–7, 9, 14], наблюдались при лабораторном моделировании провалов [10]. Обобщая результаты наблюдений, можно выделить три стадии образования карстового провала на земной поверхности.

В первую стадию на поверхности появляются концентрические трещины, и формируется небольшое блюдцевидное понижение, во вторую стадию происходит образование сводовидного или квазицилиндрического провала, а затем, в третью стадию, происходит обрушение крутых бортов и формирование впадины устойчивой формы.

Деформации грунтов в первой стадии продолжают от нескольких минут до нескольких часов, во второй стадии — от нескольких часов до нескольких суток, а в третьей стадии — до нескольких суток. Следует отметить, что опубликованные наблюдения в основном относятся к крупным или огромным провалам с диаметрами в несколько десятков метров. Для провалов с диаметрами до 10–15 м (район г. Дзержинск) время всех стадий сокращается до нескольких минут — одного-двух часов.

Иногда процесс формирования провала на земной поверхности сопровождается гидродинамическими явлениями в виде временного исчезновения воды в колодцах, появления и исчезновения воды на дне провала и в соседних карстовых воронках, что обусловлено динамическим воздействием блоков грунта, обрушающихся в обводненную промежуточную полость.

В инженерно-геологических условиях г. Дзержинск уровни трещинно-карстовых и грунтовых вод близки, разделяющий глинистый водоупор часто не выдержан, а провалообразование создает «гидрогеологические окна», способствующие соединению водоносных горизонтов, в связи с чем кратковременные колебания уровня грунтовых вод во время провалообразования связаны именно с динамическим воздействием блоков обрушающихся грунтов.

Раскопки локальных понижений в долине р. Стырь (Украина) установили сводовидное строение зоны про-

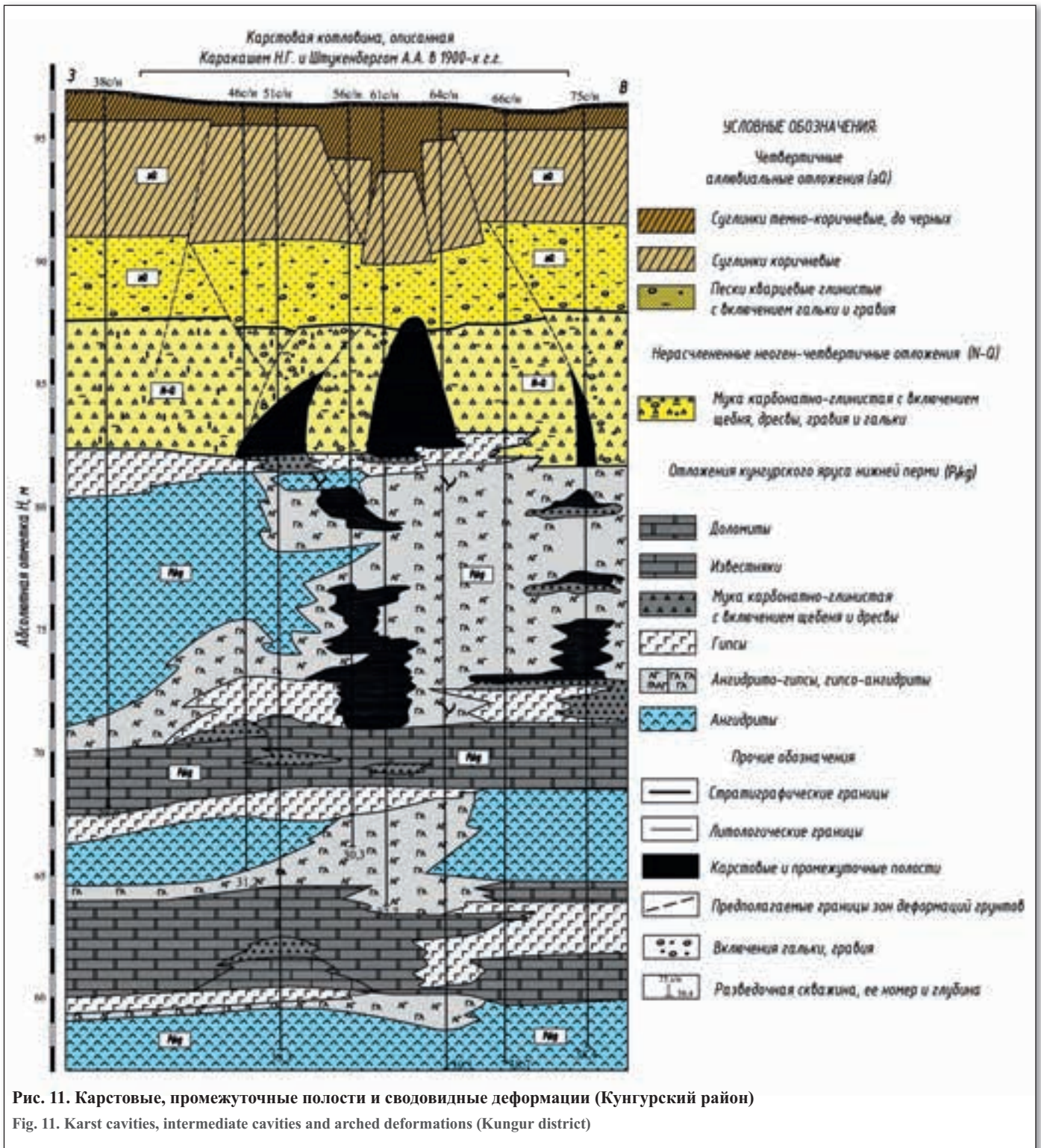


Рис. 11. Карстовые, промежуточные полости и сводовидные деформации (Кунгурский район)

Fig. 11. Karst cavities, intermediate cavities and arched deformations (Kungur district)

валов, а также омулованность центральной части некоторых провалов. Поскольку карст в этом районе развивается в мелах текучей-текучепластичной консистенции, то омулованность песков в центре провалов можно объяснить «отжатию» меловой суспензии к земной поверхности при последовательном сводовидном обрушении покровных грунтов в промежуточную полость.

Образование значительных по размерам провалов иногда сопровождается гулом и сотрясениями грунта, что свидетельствует о последовательном обрушении блоков грунта.

В 2015 г. авторам посчастливилось наблюдать динамику развития провала на земной поверхности (рис. 12).

24.04.2015 г., в 21:27:44, образование провала началось с эксцентричного эллипсовидного оседания неправильной формы с плоским дном в районе будущей северо-восточного борта провала, которое постепенно углублялось и расширялось (1 фаза).

В 21:31:41, на четвертой минуте от начала деформаций, началось образование концентрических трещин в районе будущей бровки провала, при этом земная поверхность, расположенная от края будущей бровки до границ эллипсовидного оседания, начала наклоняться в сторону первичного эллипсовидного оседания (2 фаза).

Зона первичного эллипсовидного оседания продолжала расширяться и углубляться, причем скорость дефор-



Рис. 12. Фазы образования карстового провала (г. Дзержинск)

Fig. 12. Phases of karst sinkhole development on the surface (Dzerzhinsk)

маций поверхности в пределах эллипсовидного оседания была выше, чем скорость деформаций прилегающего грунта. В пределах эллипсовидного оседания сформировалось два переуглубления (21:35:23), после чего возникла пауза (3 фаза), которая длилась около восьми минут до 21:43:04.

В 21:43:04 произошло резкое обрушение центральной части провала (4 фаза), увеличение наклона поверхности бортов, раскрытие трещин в районе будущей бровки провала. Далее в течение шести минут происходило медленное сдвижение центральной части и бортов провала до 21:49:19, после этого скорость деформаций резко замедлилась.

В целом от начала деформаций дневной поверхности до образования провальной впадины устойчивой формы прошло около 22 минут. В итоге на земной поверхности сформировалась провальная впадина в форме усеченного конуса с размерами в плане 15,4 x 12,0 м, глубиной 4,5 м, плоским дном диаметром 4,0 м. На утро

27.04.2015 г. облик провала не изменился, отмечено незначительное увеличение наклона бортов провала и оседание дна провала.

Заключение

Результаты исследований карстовых провалов в природных условиях и лабораторное моделирование механизма провалообразования не только хорошо согласуются, но и убедительно свидетельствуют о том, что разрушение покровных грунтов над карстовыми полостями при обрушении их кровли начинается с формирования промежуточной полости, поверхность которой описывается сводом естественного равновесия в соответствии с теорией М.М. Протодяконова [11].

В силу неустойчивости промежуточной полости происходит последовательное обрушение ее свода и формирование промежуточной полости на меньшей глубине. Таким образом, промежуточная полость «продвигается» к земной поверхности. При достижении промежуточной

полостью глубины, равной 1–2 ширины основания этой полости, начинается деформация земной поверхности и образование карстового провала.

В начальную стадию формирования провала на земной поверхности появляются концентрические трещины и небольшое блюдцеобразное понижение, в основную ста-

дию происходит образование сводовидного или квазицилиндрического провала, в завершающую стадию происходит обрушение бортов с формированием впадины устойчивой формы. Вокруг провала развивается зона разуплотнения грунтов, достигающая размера в плане, равного 2–3 диаметрам провала. 🌐

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунова К.А., 1979. Морфология и гидрогеология гипсового карста. Изд-во Пермского госуниверситета, Пермь.
2. Ежов Ю.А., Бураков А.Д., Лукин А.В., 1974. Карстовый провал под зданием в Кунгуре. Гидрогеология и карстование, Вып. 5. Изд-во Пермского университета, Пермь, с. 93–95.
3. Кавеев М.С., 1961. Динамика образования карстовых провалов на примерах исследований в Среднем Поволжье. Известия Казанского филиала АН СССР, серия общая, Вып. 1, с. 110–118.
4. Короткевич Г.В., 1956. Некоторые генетические особенности карстовых форм рельефа областей закрытого карста. Тезисы докладов на совещании по изучению карста, Вып. 16, Москва, 1956, с. 11–13.
5. Крубер А.А., 1900. О карстовых явлениях в России. Землеведение, Том 7, Кн. 4, с. 1–34.
6. Лукин В.С., Ежов Ю.А., 1975. Карст и строительство в районе Кунгура. Пермское книжное издательство, Пермь.
7. Максимович Г.А., 1963. Основы карстования. Изд-во Пермского университета, Пермь, Том 1.
8. Нещеткин М.О., 2015. Инженерно-геологическая оценка гидратации ангидритов и эрозии сульфатных пород в районах развития сульфатного карста речных долин. Инженерная геология, № 4, с. 54–62.
9. Нещеткин О.Б., 1986. Вопросы механизма образования карстовых провалов в песках. Изучение свойств массивов пород и геологических процессов. Наука, Москва, с. 87–4.
10. Нещеткин О.Б., 2017. Механизм образования карстовых провалов. Часть 1. Моделирование. Инженерная геология, № 5, с. 40–51, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2017-5-40-51>.
11. Протодяконов М.М., 1930. Давление горных пород и рудничное крепление. Часть 1. Давление горных пород. Гостехиздат, Ленинград.
12. Сафронова А.А., Нещеткин О.Б., 2002. Техногенная активация карста в Богдановичском карстовом районе. Сергеевские чтения, Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Вып. 4, Москва, 2002, с. 162–166.
13. Смирнов А.И., 2013. Аномально крупные карстовые провалы Южного Урала и Приуралья. Институт геологии Уфимского научного центра РАН. Геологический сборник, № 10, с. 50–56.
14. Ступишин А.В., 1967. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Изд-во Казанского университета, Казань.
15. Rey F., Suderlau G., 1984. Zum Nachweis oberflächennaher Hohlräume mit Hilfe der leichten Rammsonden. Neue Bergbautechnik, H. 1, No. 14. (на немецком)

REFERENCES

1. Gorbunova K.A., 1979. Morphology and hydrogeology of gypsum karst. Publishing house of the Perm State University, Perm. (in Russian)
2. Ezhov Yu.A., Burakov A.D., Lukin A.V., 1974. Karst collapse under the building in Kungur. Hydrogeology and karst studies, Issue 5. Publishing house of the Perm State University, Perm, pp. 93–95. (in Russian)
3. Kaveev M.S., 1961. Dynamics of formation of karst sinkholes on the examples of research in the Middle Volga region. Bulletin of the Kazan branch of USSR Academy of Sciences, Series general, Issue 1, pp. 110–118. (in Russian)
4. Korotkevich G.V., 1956. Some genetic features of karst forms of the relief of covered karst areas. Theses of the reports at the meeting on the study of karst, Issue 16, Moscow, 1956, pp. 11–13. (in Russian)
5. Kruber A.A., 1900. About karst phenomena in Russia. Zemlevedenie, Vol. 7, Book 4, pp. 1–34. (in Russian)
6. Lukin V.S., Ezhov Yu.A., 1975. The karst and the construction in Kungur. Perm book publishing house, Perm. (in Russian)
7. Maksimovich G.A., 1963. Fundamentals of karst. Publishing house of the Perm State University, Perm, Vol. 1. (in Russian)
8. Neshchetkin M.O., 2015. Engineering-geological assessment of anhydrites hydration and sulphate rocks erosion in sulphate karst regions of river valleys. Inzhenernaya geologiya, No. 4, pp. 54–62. (in Russian)
9. Neshchetkin O.B., 1986. Questions of the karst sinkhole mechanism in the sands. Study of the properties of rock massifs and geological processes. Nauka, Moscow, pp. 87–94. (in Russian)
10. Neshchetkin O.B., 2017. Sinkhole development model. Part I. Modeling. Inzhenernaya geologiya, No. 5, pp. 40–51, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2017-5-40-51>. (in Russian)

11. Protodiakonov M.M., 1930. Pressure of rocks and mine mount. Part 1. The pressure of rocks. Gostekhizdat, Leningrad. (in Russian)
12. Safronova A.A., Neshchetkin O.B., 2002. Technogenic activation of karst in Bogdanovich karst area. Sergeevsky reading, Materials of annual session of the RAS Scientific Council on environmental Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology, Issue 4, Moscow, 2002, pp. 162–166. (in Russian)
13. Smirnov A.I., 2013. Abnormally large karst sinkholes of the outhern Urals and Ural regions. Institute of Geology, Ufa Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Ufa. Geological collection, No. 10, pp. 50–56. (in Russian)
14. Stupishin A.V., 1967. Plain karst and the patterns of its development on the example of the Middle Volga region. Publishing house of the Kazan State University, Kazan. (in Russian)
15. Rey F., Suderlau G., 1984. Zum Nachweis oberflächennaher Hohlräume mit Hilfe der leichten Rammsonden. Neue Bergbautechnik, H. 1, No. 14. (in German)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**НЕЩЕТКИН ОЛЕГ БОРИСОВИЧ**

*Директор ООО Научно-производственный центр «КАРСТ»,
к.г.-м.н., г. Дзержинск Нижегородской области, Россия*

НЕЩЕТКИН МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ

*Заместитель директора ООО Научно-производственный центр
«КАРСТ», г. Дзержинск Нижегородской области, Россия*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**OLEG B. NESHCHETKIN**

*Director of the Scientific Production Center "KARST" LLC, PhD (Candidate of
Science in Geology and Mineralogy), Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Russia*

MAKSIM O. NESHCHETKIN

*Deputy Director of the Scientific Production Center "KARST" LLC, Dzerzhinsk,
Nizhny Novgorod region, Russia*



Карстовый провал на оз. Святое в г. Дзержинск, 2019 г. Фото О.Б. Нещеткина