

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ПОКРОВНОЙ ТОЛЩИ И ИХ РОЛЬ В ПРОГНОЗЕ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ

INFLUENCE OF THE MECHANICAL FEATURES OF COVERING DISPERSE SOILS ON THE PROGNOSIS OF THE KARST HAZARD

ЩЕРБАКОВ С. В.

Руководитель научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, старший научный сотрудник ООО «ПКИБЗ», к.г.-м.н., г. Пермь, greyvr@mail.ru

SHCHERBAKOV S. V.

Head of scientific laboratory of prognostic modeling in geosystems of Perm State University, Senior researcher of «PKiBZ» Ltd., PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Perm, greyvr@mail.ru

КАТАЕВ В. Н.

Научный руководитель научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах, декан геологического факультета, заведующий кафедрой динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета, д.г.-м.н., профессор, г. Пермь, kataev@psu.ru

KATAEV V. N.

Supervisor of scientific laboratory of prognostic modeling in geosystems, Dean of the Faculty of Geology, Head of the Department of Dynamic Geology and Hydrogeology, Perm State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), professor, Perm, kataev@psu.ru

Ключевые слова:

карст; провалы; полости; зоны дробления; покровные грунты; модуль деформации; угол внутреннего трения; удельное сцепление; прогноз карстоопасности.

Keywords:

karst; sinkholes; cavities; fractured zones; covering soils; deformation modulus; angle of internal friction; cohesion intercept; karst hazard.

Аннотация

Выявлена принципиальная взаимосвязь между распространением и размерами карстовых форм и основными деформационно-прочностными параметрами грунтов, слагающих покровную «надкарстовую» толщу. Определены типы и параметры теоретических распределений карстовых форм по значениям рассматриваемых механических свойств грунтов, получены и уточнены уравнения для прогноза диаметров провалов, ожидаемых на поверхности земли, высот полостей и мощностей зон дробления, развитых в карстующейся толще. Принимая во внимание распределение провалов во времени, подчиняющееся закону Пуассона, предложена формула перехода от вероятностной оценки образования провалов к одному из основных нормативных показателей оценки карстоопасности – интенсивности провалообразования. Применимость установленных зависимостей и методики оценки карстоопасности в практике инженерно-геологических изысканий рассмотрена на примере условного площадного объекта.

Abstract

The principal relation between distribution and sizes of the karst forms and general parameters of deformation and stiffness of covering soils was obtained in the paper. There were defined the types and parameters of theoretical distributions of the karst forms by values of investigated mechanical properties of covering soils. Were obtained and refined the equations to prognosis of diameters of sinkholes, which expected on the surface, heights of cavities and thicknesses of fractured zones in karst rocks. Taking into consideration distribution of sinkholes in time, which complied to Poisson's law, in the paper there was proposed the formula, which with known probability of karst forms occurrence, allow calculating one of the main parameters of karst hazard – the intensity of sinkholes occurrence. Applicability of obtained relations and technique of karst hazard estimation in the practice of engineering-geological investigations has been considered on the example of conditional area object.

Введение

Инженерно-геологическая оценка закарстованности любой территории, в разрезе которой развиты карстующиеся породы, сводится к последовательному изучению развития поверхностных и подземных форм карста с учетом геологических,

гидрогеологических, структурно-тектонических, геоморфологических и других факторов, влияющих на их распространение. Производство таких оценок в настоящее время осуществляется с применением различных методик и подходов при помощи специальных технических средств, позволяющих изучать массив горных пород как с поверхности, так и в разрезе.

На сегодняшний день уже известно, что

решающую роль в распространении карстовых форм играют геологическое строение и гидрогеологические условия территории, накладываемые на структурно-тектонический облик района. В геологическом отношении активность развития карста контролируется строением и свойствами перекрывающих грунтов, а также строением и свойствами самих карстующихся пород. При этом строение и свойства грунтов покровной толщи являются во многом определяющими факторами. Особенно когда речь идет о прогнозировании образования провалов.

Несомненно, что вопрос о влиянии свойств покровных отложений на активность и размеры карстопроявлений требует дальнейшего углубленного изучения, несмотря на то что уже определены принципиальные особенности этого влияния [1, 2, 4, 5, 7, 19] и созданы геомеханические модели и расчетные схемы установления ряда параметров прогнозируемых поверхностных форм карста [2, 10, 12]. В таких схемах, как правило, среди всех входящих в расчет величин задействуются характеристики, определяющие прочностные свойства грунтов (удельное сцепление, угол внутреннего трения, некоторые их производные) и их природная плотность, много реже – параметры пористости и фильтрационные характеристики слоев грунтовой толщи.

Таким образом, можно заключить, что в рассматриваемом вопросе остаются «за скобками» следующие направления исследования:

- влияние широкого спектра физических (влажности, содержания органических веществ, степени засоленности, гранулометрического состава и пр.) характеристик грунтов покровной толщи, а также параметров, характеризующих их деформационные свойства, на размеры карстовых полостей и провалов;
- возможность прогнозирования активности и интенсивности развития карста в зависимости от свойств покровных грунтов.

Авторами предпринята попытка установить общий характер изменения закарстованности и размеров карстопроявлений в зависимости от механических (деформационно-прочностных) характеристик грунтов покровной толщи на основе массового статистического анализа данных. Отметим, что анализ прочностных параметров скальных (в том числе карстующихся) грунтов в данной работе заведомо не производился, так как наибольшую опасность в части образования провалов на земной поверхности несет обрушение именно покровной толщи дисперсных грунтов в незаполненные полости.

Методика исследования

Изучение зависимости распространения закарстованности от механических характеристик свойств покровных грунтов с применением вероятностно-статистического анализа производилось в пределах четырех участков развития сульфатного и карбонатно-сульфатного карста, расположенных в Пермском крае. Это территории г. Кунгура, пгт. Полазна, пос. Октябрьский и участка трассы магистрального газопровода Ужгородского коридора в Ординском районе.

В ходе многолетних исследований и работ по сбору и обработке информации [6] были составлены базы данных, содержащие сведения о распространении карстовых форм, геологическом строении, гидрогеологических и инженерно-геологических условиях этих участков (по материалам бурения), а также о свойствах грунтов, карстующихся пород и подземных вод по данным опробования.

Следует сказать, что попытка поиска таких зависимостей уже предпринималась нами ранее на примере одного из выше отмеченных участков – территории г. Кунгура [13, 18]. Это исследование показало, что для получения более устойчивых и конкретизированных зависимостей необходимо вовлечение в рассмотрение широкого спектра данных по нескольким участкам, приуроченным к разным обстановкам развития карста.

Методика статистического анализа взаимосвязей между развитием карстовых форм, их размерами и различными показателями-факторами природных условий подробно рассмотрена в авторских публикациях [14, 16, 20, 21]. В данной работе остановимся лишь на перечислении ее основных особенностей, среди которых целесообразно выделить следующие:

- анализ закономерностей изменчивости показателей-факторов природных условий по площади производится через построение цифровых картографических моделей;
- картографически сопоставляются цифровые модели изменчивости показателей-факторов природных условий и карстопроявления, представленные в виде точечного слоя;
- проводится интегральный анализ различных карстопроявлений (карстовых воронок на поверхности земли, полостей и зон дробления в толще грунтового массива);
- определяются средние размеры (диаметры провалов, высоты полостей и вертикальные мощности зон дробления) возможных для данных условий (невывявленных) карстопроявлений в результате анализа тренда изменчивости размеров выявленных карстовых форм с учетом значений показателей-факторов природных условий.

Ключевой момент методики сводится к совместному исследованию изменчивости размеров различных карстовых форм с учетом их предварительной нормализации (или приведения к общему знаменателю) в результате расчета специального показателя — индекса морфометрии I [14, 16]. Данный показатель определяется как отношение частного значения исследуемой характеристики к максимальному значению, установленному в конкретном исследуемом регионе. Аналогичный показатель применяется и для анализа численных значений факторов природных условий.

В качестве изучаемых механических свойств грунтов в статистическом анализе участвуют модуль деформации E (в литературных источниках данный параметр часто именуется модулем общей деформации E_0), угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c [15]. Выбор модуля деформации помимо основных параметров прочности грунта, используемых в модели Кулона – Мора, не случаен. Известно,

Взаимосвязь лабораторных и табличных значений основных механических свойств дисперсных грунтов покровной толщи на исследуемых территориях				
Свойство	Количество пар значений, шт.		Количество пар значений в выборке, %	Коэффициент линейной корреляции, д.е.
	в генеральной совокупности	в выборке		
<i>А. Оценка связи по грунтовым пробам</i>				
Модуль деформации	1401	1284	91,6	0,71
Угол внутреннего трения	1459	1141	78,2	0,71
Удельное сцепление	1430	1219	85,2	0,72
<i>Б. Оценка связи по средним значениям свойств в скважинах</i>				
Модуль деформации	396	352	88,9	0,72
Угол внутреннего трения	511	405	79,3	0,72
Удельное сцепление	510	441	86,5	0,72

что залегающие в массиве грунты в естественных условиях испытывают всестороннее сжатие как от собственного веса, так и от воздействующих на них извне статических и динамических нагрузок. На фоне напряженно-деформированного состояния в условиях действующих локальных растяжений развивается процесс провалообразования. Таким образом, модуль деформации является косвенным параметром, оказывающим влияние на образование карстопроявлений.

В анализе использованы данные лабораторных исследований проб грунтов, отобранных в разные годы из шурфов и скважин, пройденных в пределах рассматриваемых территорий разными организациями. Отсюда следует отметить ряд допущений, которые оказывают определенное влияние на «чистоту» анализа:

- сеть выработок, из которых производилось опробование, неравномерна по площади;
- большая часть выработок не вскрывает покровную толщу на полную мощность;
- опробование грунтов на предмет изучения деформационно-прочностных характеристик выполнено неравномерно по глубине для большей части горных выработок;
- лабораторные исследования грунтов выполнены в разных лабораториях с применением различной приборной базы.

Основным методом установления механических характеристик послужили данные компрессионных и сдвиговых испытаний. Истинные значения модуля деформации определялись с учетом коэффициента mk , рекомендуемого к применению СП 22.13330.2011 [9]. После систематизации всех проб в рамках единой базы данных в пределах территорий исследования отмечено порядка 1500 проб грунтов с полностью или частично установленными физико-механическими характеристиками, приуроченных к более чем 400 скважинам.

Ввиду неравномерной сети изученности грунтов на рассматриваемых территориях сдвиговыми и компрессионными испытаниями в настоящих исследованиях помимо лабораторных значений механических характеристик использованы также их табличные значения, определенные согласно приложению Б СП 22.13330.2011 [9] с учетом значений физических свойств и номенклатуры грунтов. Табличные значения механических характеристик свойств определены для каждой отдельно взятой пробы грунта, классифицирующей полным набором физических характеристик. Всего таких проб в анализе оказалось более 3300 штук, а количество скважин, из которых осуществлялся отбор, приближается к 1000.

Точность оценки механических характеристик по таблицам СП 22.13330.2011 [9] проверена путем сопоставления их значений с результатами прямых лабораторных испытаний двумя способами. Первый способ заключался в оценке корреляционных связей между механическими характеристиками, установленными двумя выше обозначенными методами в результате анализа каждой отдельно взятой пробы. Второй способ ориентирован на определение связи между табличными и лабораторными значениями механических свойств грунтов в скважинах в результате осреднения значений по отобранным из них пробам. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 1. Как видно, между значениями механических характеристик, определенных разными способами, наблюдается весьма устойчивая прямая корреляция, а после удаления из общей совокупности наиболее отклоняющихся пар значений связь между ними становится весьма тесной с коэффициентом линейной корреляции, превышающим 0,7. Наличие столь тесных связей позволяет в ходе карстологических исследований использовать табличные значения механических характеристик свойств грунтов наравне с их значениями, установленными в лабораторных условиях.

Цифровые картографические модели площадной изменчивости исследуемых свойств грунтов, задействованные в дальнейшем анализе, построены по их средним значениям, определенным в рамках каждой отдельно взятой скважины. Осреднение осуществлялось обычным методом в результате расчета средних арифметических значений характеристик механических свойств в скважинах.

Результаты и их обсуждение

В результате сопоставления по участкам пространственного распределения карстовых форм и свойств перекрывающих грунтов было установлено, что большая часть карстовых форм тяготеет к участкам, характеризующимся средними значениями модуля деформации и удельного сцепления с небольшой асимметрией в сторону больших значений (рис. 1–3). Данное наблюдение полностью повторяет выводы, сделанные ранее при рассмотрении характеристик физических свойств грунтов на территории г. Кунгура [13].

В целом точность выражения наблюдаемых распределений нормальным законом достаточно высока. Однако исходя из сущности таких показателей, как модуль деформации и угол внутреннего трения, нулевые и близкие к нулю значения относительно редки и характерны главным образом для слабых грунтов, их итоговые обобщенные распределения описаны логнормальными законами, которые в данных исследуемых случаях в целом повторяют нормальные распределения.

Установленные параметры распределений, приведенные в таблице табл. 2, позволяют вести вероятностный прогноз карстовой опасности, опираясь на значения свойств грунтов покровной толщи.

На рисунках 4–5 довольно отчетливо

прослеживается тенденция к росту средних значений морфометрических параметров карстовых форм на фоне роста значений модуля деформации и угла внутреннего трения грунтов. Наиболее ярко данная тенденция проявляется при анализе зон дробления, для которых характерно резкое увеличение мощности при высоких значениях этих двух механических характеристик. Обратный характер отмеченной выше зависимости характерен для угла внутреннего трения только при исследованиях в пределах пгт. Полазна и приграничных территорий. Также следует заметить, что в случае поверхностных карстовых форм тенденция к росту их средних диаметров с увеличением модуля деформации и угла внутреннего трения при одновременном анализе сразу в пределах всех территориальных единиц не подтверждается. По всей видимости, это вызвано спецификой методики исследования, а также различием воронок по механизму образования (обвальное-карстовый, карстово-суффозионный и их разновидности) [1], который никак не учитывался в данных исследованиях. К сожалению, определить механизм образования конкретного провала, исследуя в полевых условиях уже существующую карстовую воронку, зачастую не представляется возможным.

Влияние удельного сцепления на морфометрические характеристики карстопроявлений, напротив, обратное (рис. 6). Наиболее четко тенденция к уменьшению средних диаметров провалов и высот подземных карстовых форм с увеличением сцепления грунтов покровной толщи прослеживается на территории Ординского района и пос. Октябрьский. К сожалению, какую-либо взаимосвязь между этими величинами не удалось оценить в пределах территорий г. Кунгура и пгт. Полазна. Обобщающая кривая изменчивости морфометрии карстовых форм в этих районах ориентирована почти горизонтально.

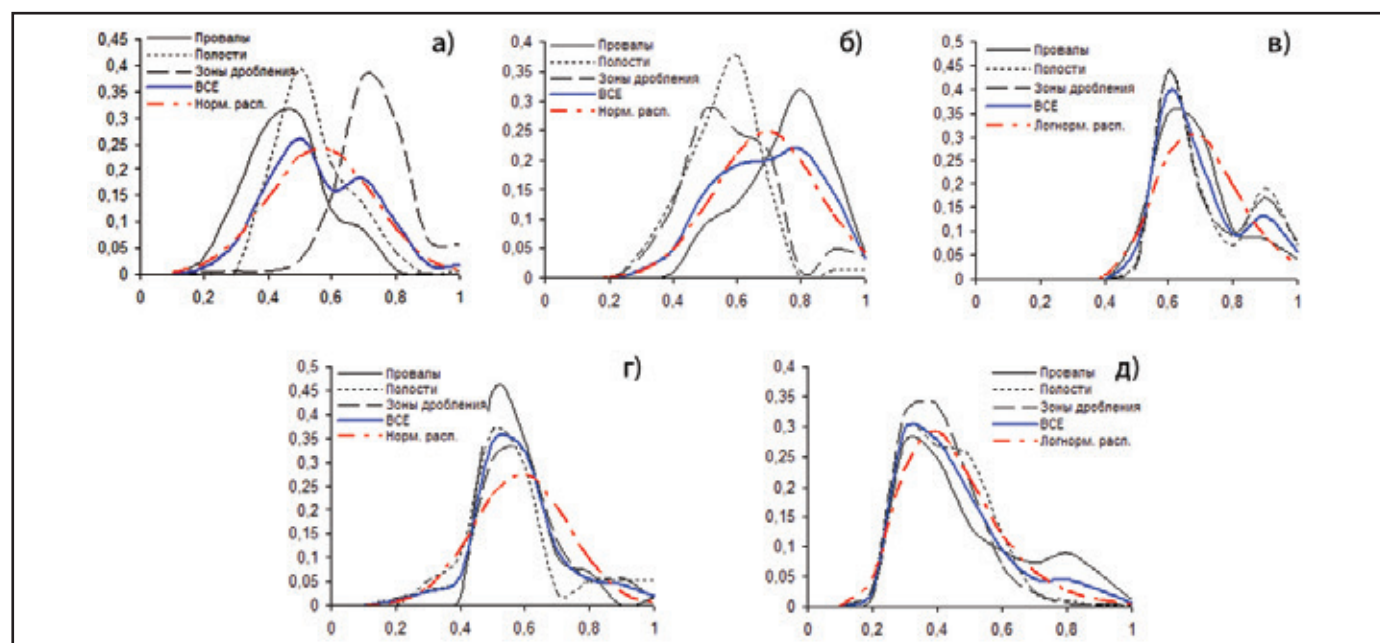


Рис. 1. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений модуля деформации (МПа) грунтов покровной толщи (ось X) в пределах территории: а – г. Кунгура; б – пгт. Полазна; в – Ординского района; г – пос. Октябрьский; д – всех рассматриваемых участков

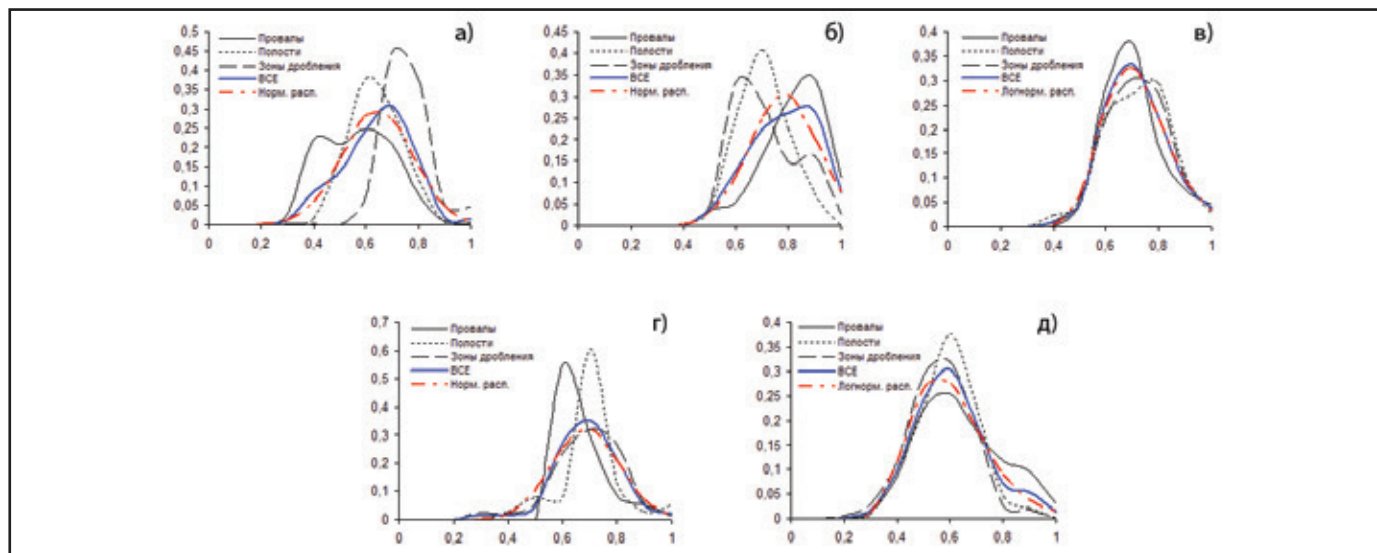


Рис. 2. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений угла внутреннего трения (градус) грунтов покровной толщи (ось X) в пределах территории: а – г. Кунгура; б – пгт. Полазна; в – Ординского района; г – пос. Октябрьский; д – всех рассматриваемых участков

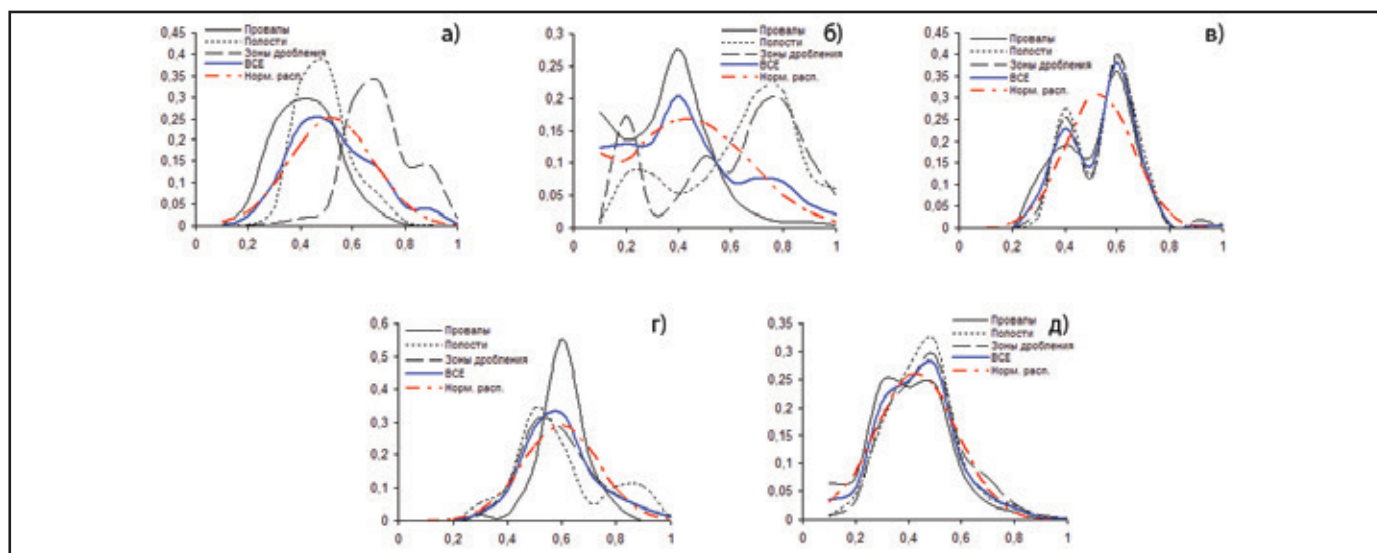


Рис. 3. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удельного сцепления (кПа) грунтов покровной толщи (ось X) в пределах территории: а – г. Кунгура; б – пгт. Полазна; в – Ординского района; г – пос. Октябрьский; д – всех рассматриваемых участков

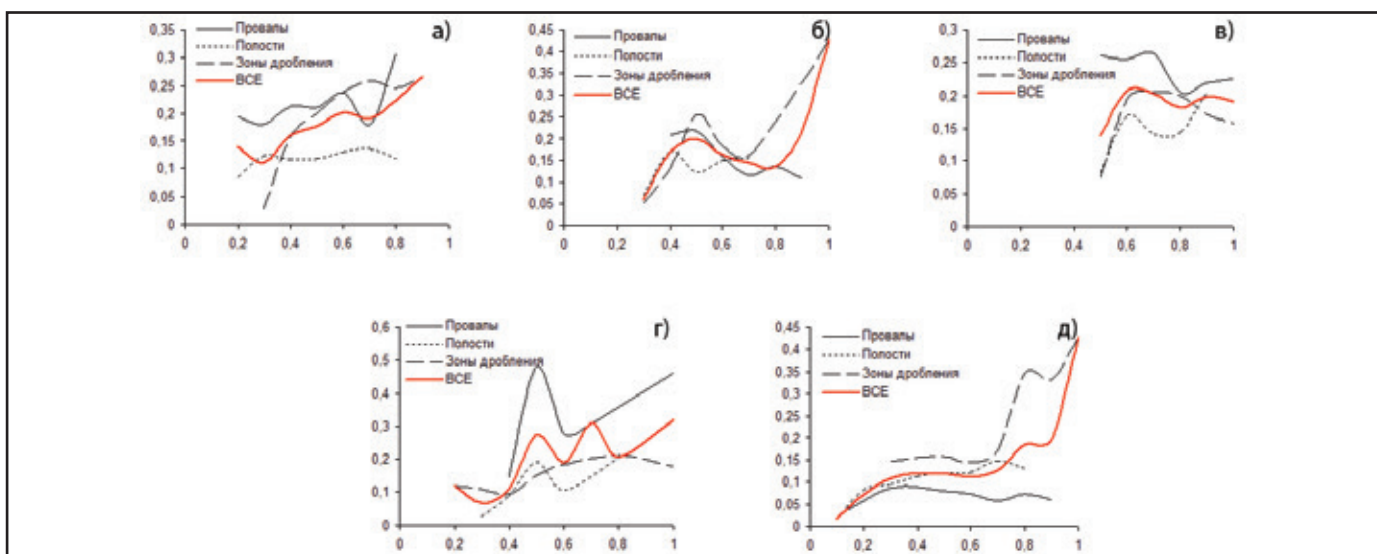


Рис. 4. Нормализованные средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений модуля деформации (МПа) грунтов покровной толщи (ось X) в пределах территории: а – г. Кунгур; б – пгт. Полазна; в – Ординского района; г – пос. Октябрьский; д – всех рассматриваемых участков

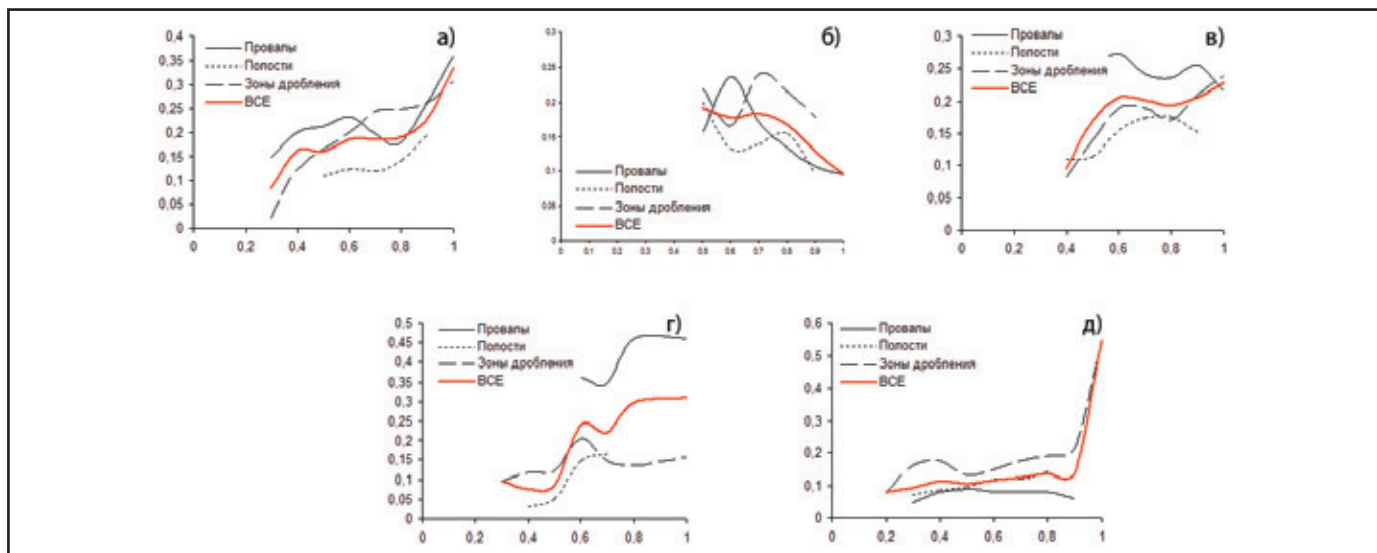


Рис. 5. Нормализованные средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений угла внутреннего трения (градус) грунтов покровной толщи (ось X) в пределах территории: а – г. Кунгура; б – пгт. Полазна; в – Ординского района; г – пос. Октябрьский; д – всех рассматриваемых участков

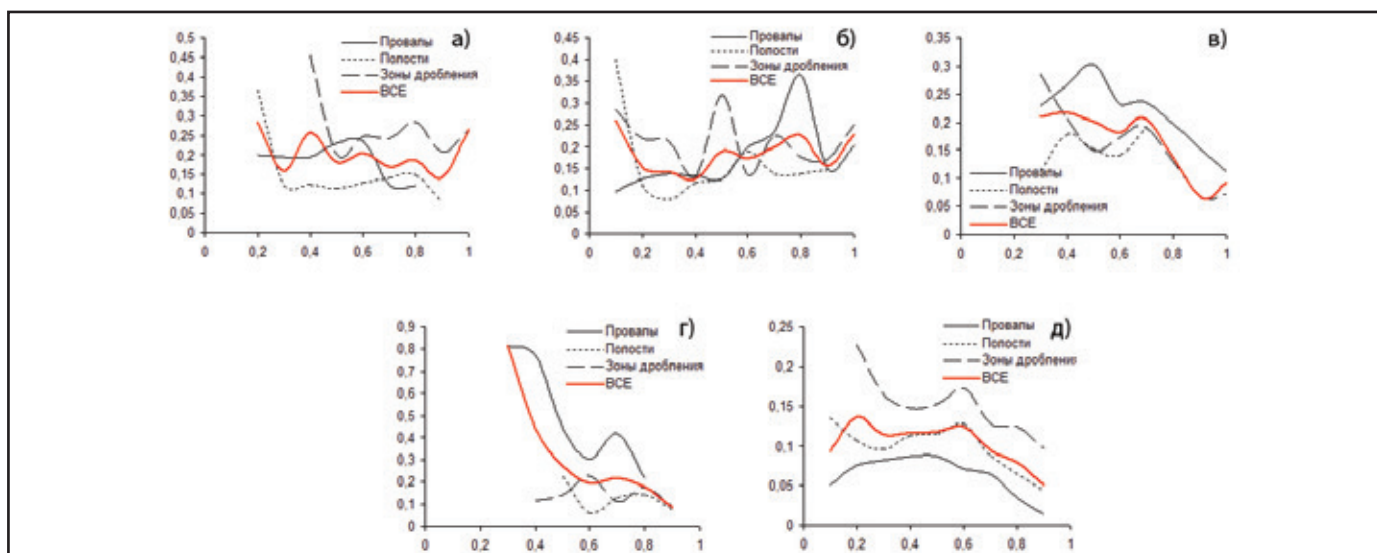


Рис. 6. Нормализованные средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удельного сцепления (кПа) грунтов покровной толщи (ось X) в пределах территории: а – г. Кунгура; б – пгт. Полазна; в – Ординского района; г – пос. Октябрьский; д – всех рассматриваемых участков

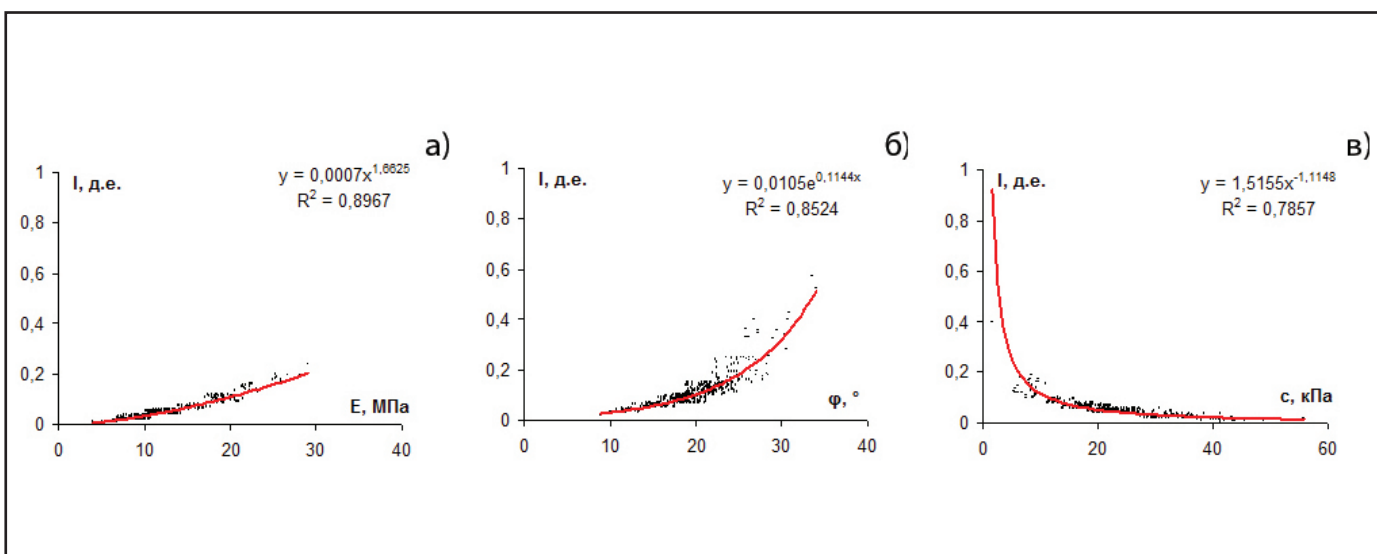


Рис. 7. Прогнозные кривые для оценки морфометрических параметров карстовых форм в индексном выражении по значениям характеристик механических свойств грунтов покровной толщи: а – модуля деформации; б – угла внутреннего трения; в – удельного сцепления

Параметры распределений и зависимостей для прогнозирования вероятности образования и индекса морфометрии карстовых форм с учетом деформационно-прочностных свойств грунтов покровной толщи							
Характеристики механических свойств		Прогноз вероятности образования карстовых форм			Прогноз морфометрических характеристик карстовых форм в индексном выражении		
		Параметры теоретического закона распределения		Вид закона	Коэффициенты прогнозного уравнения		Характер зависимости
		среднее x_{sr}	стандартное отклонение σ		a	b	
Модуль деформации, МПа	E	2,70	0,37	логнорм.	0,0007	1,6625	степенная
Угол внутреннего трения, °	φ	3,03	0,26	логнорм.	0,0004	1,9138	степенная
Удельное сцепление, кПа	c	22,23	8,76	норм.	0,3580	-0,0640	экспоненц.

В ходе статистической обработки двумерного облака точек, сформированного парами значений рассматриваемых механических характеристик свойств грунтов и морфометрических величин карстопоявлений, выраженных в индексной (нормализованной) форме, с учетом установленных трендов и авторской методики [14], были рассчитаны прогнозные зависимости и построены их кривые (рис. 7; табл. 2). Прогнозные уравнения для расчета индексных значений морфометрических параметров карстовых форм в зависимости от принятого к рассмотрению тренда и характера зависимости имеют следующий вид:

- экспоненциальная зависимость,

$$I = a \cdot e^{bx} \quad (1)$$

- степенная зависимость,

$$I = a \cdot x^b \quad (2)$$

где I – прогнозный индекс морфометрии, д.е.; x – исследуемое свойство грунтов покровной толщи; a и b – коэффициенты прогнозного уравнения.

Переход от индексных оценок морфометрических параметров карстовых форм к реальным значениям осуществляется умножением величины I на максимальные значения размеров карстовых форм, установленных в пределах исследуемых районов (табл. 3).

Отдельно отметим, что некоторые из статистически установленных зависимостей для определения размеров карстовых форм имеют верхние пределы применимости, при превышении которых результат расчета является некорректным. Для модуля деформации такой предел составляет 100 МПа, для угла внутреннего трения – 50 градусов, для удельного сцепления верхний предел отсутствует. Нижним пределом для всех исследуемых величин деформационно-прочностных свойств является 0.

Использование статистических закономерностей при оценке карстоопасности

Полученные распределения карстовых форм и зависимости их морфометрических параметров от исследуемых механических характеристик свойств грунтов покровной толщи могут быть в той или иной степени применены при инженерно-карстологической оценке закарстованных территорий Пермского края. При должном обосновании эти зависимости также могут быть распространены и на закарстованные территории других регионов РФ.

Прогноз развития карстовых форм. По установленным распределениям (см. табл. 2) может быть вычислен один из основных параметров карстоопасности,

Таблица 3

Максимальные значения морфометрических характеристик карстовых форм, встречающиеся в границах исследуемых районов		
Морфометрические параметры карстовых форм, м		Максимальное значение
Средний диаметр поверхностных провальных карстовых форм	d	100,0
Высота карстовых полостей	h_p	18,0
Мощность зон дробления	h_z	31,5

регламентируемый СП 11-105-97, ч. II [8] – интенсивность провалообразования λ (шт./км² год). Характерным преимуществом применения статистических распределений карстовых форм по значениям рассматриваемых физико-механических характеристик является возможность объективного прогноза интенсивности провалообразования в условиях интенсивной застройки при отсутствии данных об изначальном рельефе местности, а также в условиях фактического отсутствия поверхностных карстопроявлений на участках с естественным сложением рельефа.

Ранее установлено [11], что вероятность образования карстовых провалов во времени на единице площади достаточно точно описывается законом редких событий (Пуассона). Так, вероятность P образования хотя бы одного провала при известной интенсивности их формирования на исследуемой территории определяется формулой:

$$P = 1 - e^{-\lambda} \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что при известной вероятности P интенсивность провалообразования можно будет определить, воспользовавшись формулой:

$$\lambda = -\ln(1-P) \quad (4)$$

Величина вероятности P достаточно легко вычисляется из выше приведенных распределений карстовых форм по значениям исследуемых деформационно-прочностных характеристик грунтов покровной толщи. Один из простейших способов ее определения — графический (рис. 8). Он заключается в анализе интегральных кривых распределений, который сводится к последовательному выполнению следующих действий:

- определение минимального x_{min} и

максимального x_{max} значений исследуемого свойства грунтов, слагающих покровную толщу, в пределах площади изыскиваемого участка;

- определение значений накопленных частостей (интегральной функции) F_{max} и F_{min} , соответствующих значениям x_{max} и x_{min} ;
- вычисление вероятности P образования провала, как разницы между величинами F_{max} и F_{min} .

В качестве дополнительного критерия развития карстопроявлений в части поиска наиболее вероятных мест формирования провала в пределах некоторой площади может служить параметр, называемый нами относительной вероятностью p . Следует сразу оговориться, что величина p не является вероятностной в классическом понимании. Однако, оперируя ею, можно в достаточно наглядной форме по шкале от 0 до 1 идентифицировать точечные участки наиболее вероятного формирования провальной воронки. Относительная вероятность представляет собой результат нормирования дифференциальной функции распределения карстовых форм по значениям исследуемых свойств. В математическом плане это отношение дифференциальной функции f распределения карстопроявлений, определенной для конкретного значения x свойства грунта покровной толщи, к максимальному значению дифференциальной функции f_{sr} , которое в случае нормального и логарифмически нормального законов распределения она принимает при вычислении относительно среднего значения x_{sr} данного свойства (см. табл. 2):

$$p = \frac{f(x)}{f(x_{sr})} \quad (5)$$

Как и в случае с вероятностью P , значение относительной вероятности удобнее всего определять графическим методом (см. рис. 8). Для этого достаточно определить ординату точки нужного графика

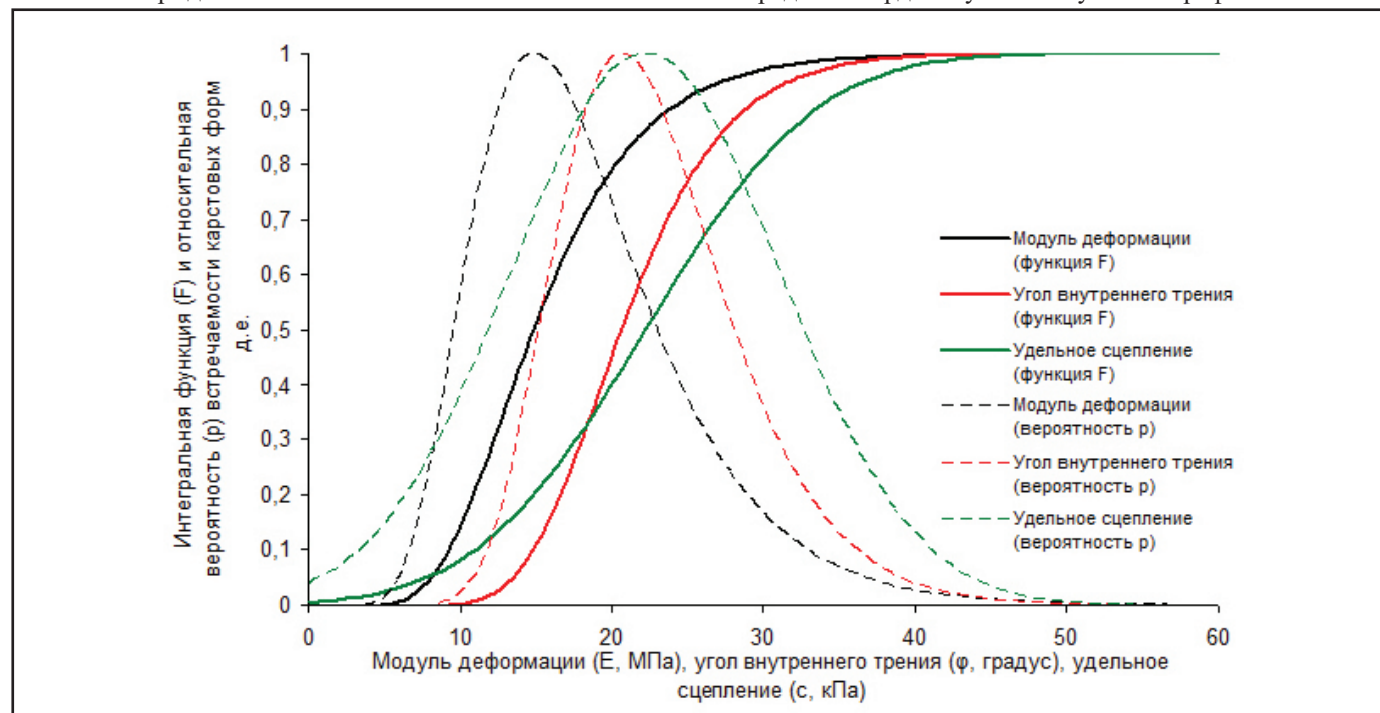


Рис. 8. Интегральные кривые (функция F, используемая для определения вероятности P) и нормированные дифференциальные кривые (относительная вероятность p) распределений карстовых форм в зависимости от значений модуля деформации, угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов покровной толщи

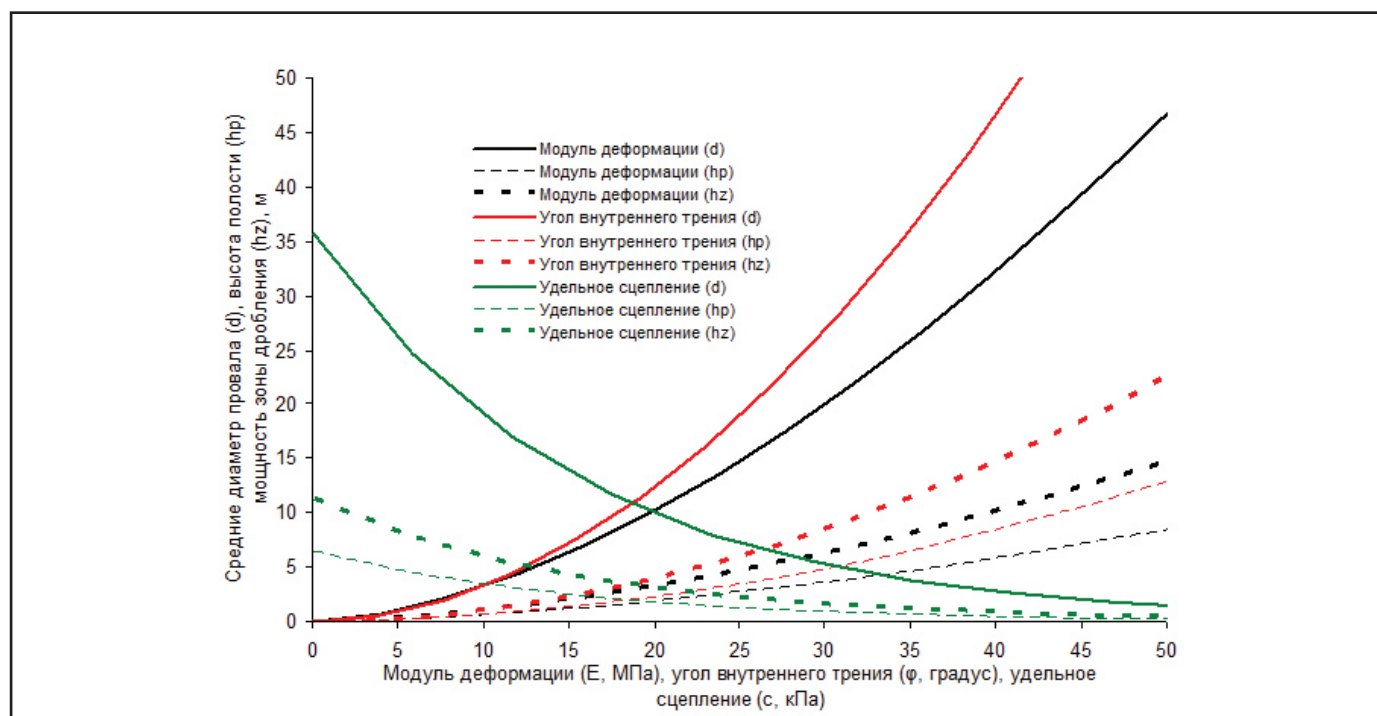


Рис. 9. Графики зависимостей морфометрических характеристик карстовых форм от значений модуля деформации, угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов покровной толщи (расшифровка буквенных обозначений приведена в табл. 2)

при известном значении соответствующего свойства.

Прогноз морфометрических параметров карстовых форм. Установленные в ходе исследований зависимости дают возможность, опираясь на значения механических свойств грунтов покровной толщи отложений, определять второй основной параметр карстоопасности, регламентируемый СП 11-105-97, ч. II [8] — средний диаметр карстового провала d (м). Для этого следует использовать уравнения (1)-(2) и данные табл. 2, 3. Еще раз заметим, что предлагаемый подход позволяет не только осуществлять оценку диаметров провалов, но и прогнозировать высоты полостей и мощности зон дробления, наиболее характерные для данных грунтовых условий. На рисунке 9 установленные аналитические зависимости представлены в виде графиков, которые позволяют производить предварительную оценку без необходимости выполнения расчетов.

Следует сказать, что установленные зависимости при одновременном и равнозначном анализе всех трех исследуемых свойств применимы, главным образом, к провалам карстово-обвального типа (с некоторыми допущениями, карстово-суффозионно-обвального или «смешанного» типа), подразумевающего полное обрушение грунтов покровной толщи в полость-приемник по цилиндрической поверхности скольжения. Такая модель подразумевает, что при общем повышении деформационно-прочностных свойств грунтов высота полости (а вместе с ней и остальные ее линейные размеры), необходимая для обрушения грунтов, и, как следствие, ожидаемый диаметр провала на поверхности будут увеличиваться. В действительности же катастрофические провалы больших диаметров, возникающие в условиях мощной толщи покровных отложений, сложенных достаточно прочными грунтами (например,

твердыми коренными глинами), встречаются относительно редко. В абсолютном большинстве случаев в таких условиях обрушение грунта в полость ограничивается внутренним вывалом пород кровли полости. Такой процесс может затухнуть на первой же стадии и, наоборот, происходить неоднократно, в результате чего полость постепенно будет перемещаться вверх по разрезу покровной толщи. Вследствие такого движения на дневной поверхности может либо сформироваться либо понижение, связанное с постепенным оседанием грунта, произойти относительно небольшой провал в результате обрушения выше залегающего грунта в образованную таким образом вторичную, или даже третичную, полость. Механизм образования таких провалов детально рассмотрен в работах В.П. Хоменко [12].

Прогноз диаметров карстовых провалов, образованных в результате обрушения вторичных карстовых пустот, приуроченных к покровной толще грунтов, с применением рассматриваемых статистических зависимостей возможен при условии особого внимания на величину удельного сцепления. Роль именно этого параметра прочности является доминирующей при определении диаметров провалов во всех геомеханических моделях. Особенно четко эффект сцепления наблюдается при развитии глинистых грунтов в покровной толще. К сожалению, универсального решения для прогнозирования диаметров таких провалов по статистическим зависимостям от удельного сцепления нет. Наиболее действенным решением, по нашему мнению, является применение экспертного подхода при назначении весов механическим характеристикам свойств грунтов в статистической модели для каждого конкретного случая строения покровной толщи.

Прогноз эффективности выполнения

геотехнических работ. Одним из немаловажных, но слабо проработанных на сегодняшний день вопросов является проблематика переоценки карстовой опасности после проведения геотехнических мероприятий по усилению грунтов покровной толщи. Данный вид противокарстовой защиты в последнее время достаточно широко применяется в условиях относительно неглубокого залегания карстующихся пород (до 30–40 м), когда покровная толща сложена преимущественно аллювиально-делювиальными и элювиальными глинистыми грунтами, а также песчаными грунтами, в различной степени подверженными суффозионному выносу. На сегодняшний день подобные задачи, связанные с определением эффективности геотехнических работ, в преобладающем числе случаев разрешаются путем верификационных определений физико-механических свойств грунтов на участках и глубинных интервалах, в пределах которых произведено закрепление грунтов. Выводы об изменении карстовой опасности при этом носят качественный характер и сводятся к экспертному назначению менее опасной категории устойчивости по интенсивности провалообразования и перерасчету диаметра провала по детерминистическим формулам или по результатам моделирования [3].

При известных распределениях карстовых форм, представленных в значениях механических характеристик грунтов покровной толщи, появляется возможность объективного разрешения первой части данной задачи – переоценки интенсивности провалообразования. Для этого можно воспользоваться формулами (3) и (4). Вероятность образования провала P при этом следует определять по измененным после закрепления механическим характеристикам грунтов.

Если интенсивность провалообразования в естественных условиях уже была определена каким-либо из нормативных способов (СП 11-105-97, ч. II) или назначена экспертно, то для прогноза ее изменения в результате закрепления грунтов может быть применена следующая формула:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1 F_1 p_2}{F_2 p_1} \quad (6)$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность провалообразования до и после проведения геотехнических работ, шт./км² год; F_1 и F_2 – интегральная функция распределения при значении свойства до и после проведения геотехнических работ, д.е.; p_1 и p_2 – относительная вероятность при значении свойства до и после проведения геотехнических работ, доли единицы (д.е.).

Значения интегральных функций F_1 и F_2 , а также относительных вероятностей p_1 и p_2 помимо прямого расчета могут быть определены графически из рис. 8.

К сожалению, результаты переоценки диаметра провала после проведения геотехнических работ с применением рассматриваемых статистических зависимостей не так однозначны. Закрепленные грунты покровной толщи характеризуются повышенными (улучшенными) параметрами физико-механических свойств. Как уже было сказано выше, при повышении механических параметров увеличиваются и прогнозируемые по статистическим моделям величины

диаметров провалов, а также высоты полостей и мощности зон дробления, необходимые для их образования. Прогноз же диаметров провалов, сформированных в результате обрушения вторичных полостей, с применением статистических зависимостей не имеет конкретного решения. В таком случае для оценки диаметра провала после проведения геотехнических мероприятий наиболее целесообразно определять его расчетом с применением детерминистических формул и схем, а также методов математического моделирования.

Практическое применение установленных зависимостей

Рассмотрим применение предлагаемого подхода к оценке карстоопасности на примере абстрактной территории, на которой проектируется многоквартирный 10-этажный жилой дом размерами в плане 40×100 м, уровень ответственности – II.

На изыскиваемой территории развит сульфатно-карбонатный тип карста с преобладанием в геологическом разрезе известняков и доломитов с отдельными прослоями и прослойками гипсов и ангидритов. Покровная толща представлена песчано-глинистыми грунтами, слои относительно выдержаны по мощности и по разрезу. Сводный инженерно-геологический разрез, расчлененный на отдельные инженерно-геологические элементы (ИГЭ), сверху вниз следующий (рис. 10):

ИГЭ-1. Насыпной грунт (tQ): песок мелкий и средней крупности коричневого, перемешанный с суглинком коричневым полутвердым и тугопластичным, с включениями щебня, дресвы, строительного мусора до 5–15%. Слежавшийся. Возраст более 10 лет. Мощность 0,5–1,5 м.

ИГЭ-2. Песок (aQ) мелкий коричневого, рыхлый, малой степени водонасыщения, с редким гравием и тонкими прослойками супеси пластичной. Мощность 1,0–2,9 м.

ИГЭ-3. Песок (aQ) мелкий коричневого, в отдельных тонких прослойках до средней крупности, средней плотности, насыщенный водой, с частыми тонкими прослоями суглинка мягко- и текучепластичного. Мощность 10,3–14,3 м.

ИГЭ-4. Суглинок (aQ) светло-коричневый, в отдельных прослоях серый, тугопластичный до мягкопластичного, тяжелый песчаный, с включениями гравия и дресвы кремнистых и известковистых пород до 5–10%. Невыдержан по простиранию. Мощность 0,9–3,7 м.

ИГЭ-5. Глина (eP₂) красновато-коричневая, полутвердая, легкая пылеватая, с сульфатными включениями и стяжениями, с включениями щебня и дресвы гипса и известняка до 15–20%. Мощность 5,3–11,9 м.

ИГЭ-6. Известняк (P₁) светло-серый низкой прочности, сильнотрещиноватый (трещинами разбит на щебень и дресву), размягчаемый, выветрелый, слабый. Вскрытая мощность 2,5–6,8 м.

На участке вскрыт водоносный горизонт, приуроченный к толще аллювиальных песков. Установившийся уровень зафиксирован на глубинах

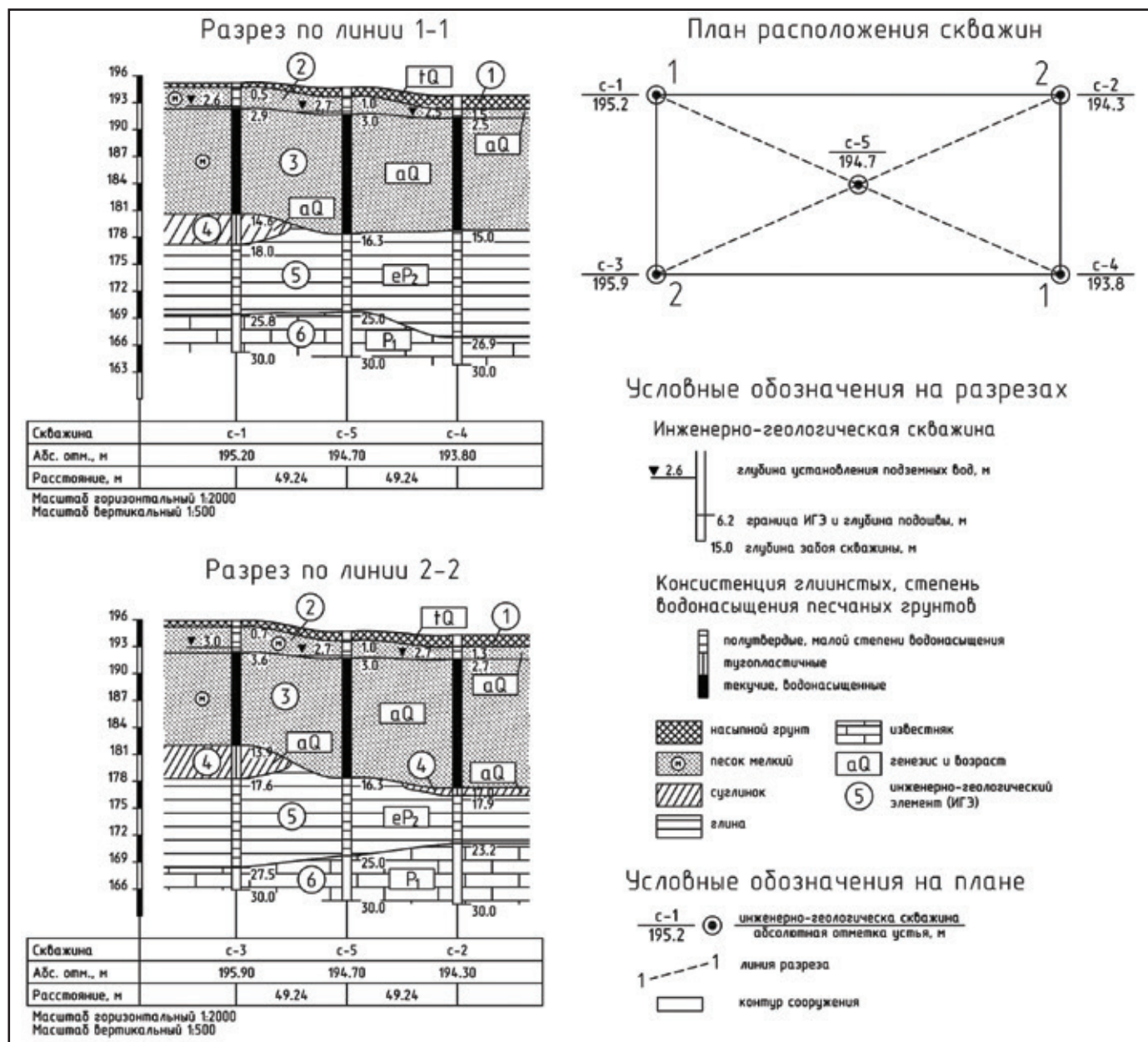


Рис. 10. План расположения скважин с инженерно-геологическими разрезами площадки изысканий

2,5–3,0 м. Карстующаяся толща известняков в кровле не обводнена, полостей на контакте между глинами и известняками, а также в толще известняков скважинами не вскрыто.

Нормативные значения механических характеристик свойств грунтов ИГЭ, выделенных в покровной толще, приведены в табл.4. В таблице 5 приведены значения рассматриваемых механических параметров в каждой отдельной скважине, рассчитанные как средневзвешенные по мощности отдельных ИГЭ.

Результаты определения карстоопасности с применением рассматриваемой методики приведены в табл. 6–8.

В таблице 6 приведен расчет вероятности и интенсивности образования провалов в районе, к которому приурочена изыскиваемая площадка. Для этого сначала определены частные вероятности образования провалов отдельно для каждого из трех исследуемых механических свойств. Итоговая вероятность определена в результате осреднения частных величин. Интенсивность провалообразования вычислена по

формуле (4) от средней вероятности образования провалов. Таким образом, интенсивность образования провалов при данных свойствах грунтов покровной грунтовой толщи составляет 0,27 шт./км²-год, что соответствует II категории устойчивости. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что вероятность образования провалов будет тем выше, чем сложнее инженерно-геологический разрез площадки и шире дифференцированность слагающих ее грунтов по свойствам.

В таблице 7 приведен расчет относительной вероятности образования провала. Вычисления приурочены к каждой скважине и выполнены для каждого из трех исследуемых свойств грунта. Итоговая величина относительной вероятности определена в результате осреднения частных величин, установленных по конкретным свойствам. Согласно расчету наиболее вероятный ореол образования провала в границах площади проектируемого сооружения тяготеет к месту расположения скважин № 1 и 3. В инженерно-геологическом отношении в данных

скважинах вскрывается прослой тугопластичных суглинков (ИГЭ 4).

Частные морфометрические характеристики карстовых форм определены для минимального, максимального и среднего из средневзвешенных значений механических свойств грунтов, развитых в покровной толще (см. табл.5). Итоговые средние значения морфометрических показателей карстовых форм определены в результате осреднения их частных величин, установленных для конкретных свойств (табл. 8). В результате расчетов средний диаметр провала составил 13,9 м, что соответствует категории устойчивости Б. Средняя высота карстовой полости и мощность зоны дробления, при которых возможно образование провала указанного диаметра в данных условиях, составляют 3,8 и 6,6 м соответственно.

Таким образом, итоговая карстоопасность участка изысканий, опираясь лишь на деформационно-прочностные свойства грунтов покровной толщи, оценивается категорией устойчивости II-Б.

Заметим, что произведенная оценка является некоторым приближением к реальной карстоопасности, так как не учитывает структурно-тектонические условия (тип структуры, плотность разрывных нарушений, линеаментов), геоморфологические особенности (элемент рельефа, удаленность от речной сети, превышение над среднегодовым уровнем рек), геологическое строение (общую мощность покровной толщи, мощности разновозрастных напластований грунтов) и гидрогеологические условия (уровень и минерализацию грунтовых вод) как самого участка, так и района производства работ в целом [20]. При полном учете всех факторов результат оценки, полученной только по свойствам грунтов покровной толщи, может быть существенным образом скорректирован. Например, для инженерно-геологических условий данного примера с учетом зависимостей и закономерностей, приведенных в работе [20], ожидаемая прогнозная категория устойчивости площадки составит IV-В с диапазонами изменчивости интенсивности провалообразования 0,02–0,04 шт./км²-год и среднего диаметра провала — 6–8 м.

Заключение

В результате проведенных исследований установлены статистические распределения и зависимости между деформационно-прочностными свойствами дисперсных грунтов покровной толщи и развитием закарстованности. На их основе разработаны и предложены:

- способы для вычисления вероятностных величин образования новых карстовых форм, как в пределах некоторой площади, так и в конкретной точке на местности;
- прогнозные уравнения для расчета морфометрических характеристик карстовых форм;
- альтернативная методика вычисления базового нормативного показателя интенсивности провалообразования, исходя из вероятности образования

Нормативные значения механических свойств грунтов покровной толщи			
№ ИГЭ	Модуль деформации E , МПа	Угол внутреннего трения φ , градус	Удельное сцепление c , кПа
1	12	25	5
2	17	31	1
3	31	29	3
4	14	20	18
5	28	14	67

Таблица 5

Нормативные значения механических свойств грунтов покровной толщи			
Скважина	Модуль деформации E , МПа	Угол внутреннего трения φ , градус	Удельное сцепление c , кПа
с-1	26,2	23,4	24,2
с-2	27,7	25,1	18,2
с-3	25,7	22,5	27,9
с-4	28,1	22,2	31,3
с-5	28,1	23,8	25,2
<i>Статистическая характеристика свойств по площадке в целом</i>			
min	25,7	22,2	18,2
max	28,1	25,1	31,3
среднее	27,2	23,4	25,4

карстовых форм;

- методика оценки эффективности проведения геотехнических мероприятий по закреплению грунтов покровной толщи, позволяющая прогнозировать интенсивность провалообразования и размеры карстовых форм после завершения инъекционных работ.

Полученные результаты позволяют в значительной степени детализировать и конкретизировать прогноз карстовой опасности, осуществляемый с применением стандартного нормативного подхода, закрепленного в СП 11-105-97, ч. II [8]. В частности, введенный параметр относительной вероятности является одной из немногих величин, с применением которой можно вести прогноз конкретных мест в пределах исследуемой площади, где наиболее вероятно будет развиваться ослабленная зона или вообще произойдет карстовый провал. Разработанный

Результаты определения вероятности образования провала на площадке и интенсивности провалообразования в исследуемом районе по физико-механическим свойствам грунтов покровной толщи										
Частные вероятности образования провалов, определенные по значениям *									Средняя вероятность образования провалов, д.е.	Интенсивность образования провалов, шт./км ² -год
модуля деформации			угла внутреннего трения			удельного сцепления				
F_{min}	F_{max}	PE	F_{min}	F_{max}	P_{φ}	F_{min}	F_{max}	P_c	P	λ
0,930	0,957	0,027	0,607	0,772	0,165	0,322	0,851	0,529	0,240	0,27

* Расшифровка буквенных обозначений величин и единиц их измерения приведена в тексте.

Таблица 7

Результаты определения относительной вероятности образования провала на площадке по физико-механическим свойствам грунтов покровной толщи				
Скважина	Частные относительные вероятности образования провала, определенные по значениям *			Средняя относительная вероятность образования провала, д.е.
	модуля деформации	угла внутреннего трения	удельного сцепления	
	P_E	P_{φ}	P_c	P
с-1	0,312	0,895	0,094	0,312
с-2	0,242	0,758	0,088	0,242
с-3	0,337	0,950	0,098	0,337
с-4	0,229	0,964	0,100	0,229
с-5	0,229	0,867	0,095	0,229

Таблица 8

Результаты определения диаметра возможного провала, размеров полостей и зон дробления с учетом физико-механических свойств грунтов покровной толщи												
Статистическая характеристика	Частные значения морфометрических параметров карстовых форм, определенные по значениям *									Средние значения морфометрических параметров карстовых форм, д.е.		
	модуля деформации			угла внутреннего трения			удельного сцепления					
	d	h_p	h_z	d	h_p	h_z	d	h_p	h_z	d	h_p	h_z
min	15,4	2,8	4,9	15,1	2,7	4,8	4,8	5,2	9,0	11,2	3,6	6,2
max	17,9	3,2	5,6	19,1	3,4	6,0	11,2	5,4	9,4	16,1	4,0	7,0
среднее	16,7	3,0	5,3	17,1	3,1	5,4	8,0	5,3	9,2	13,9	3,8	6,6

* Расшифровка буквенных обозначений величин и единиц их измерения приведена в тексте.

способ оценки карстоопасности во многом является практически безальтернативным в условиях интенсивной застройки при отсутствии данных об изначальном рельефе местности, а также в условиях фактического отсутствия поверхностных карстопоявлений на участках с естественным сложением рельефа.

По нашему мнению, дальнейшее углубление исследований в части поиска статистических

закономерностей развития карстовых форм в зависимости от свойств грунтов, а также факторов иной природы является одним из перспективных направлений развития инженерного карстоведения. В первую очередь это касается расширения географии расположения эталонных участков, вовлекаемых в анализ, а также совершенствования самой методики поиска распределений и установления зависимостей изменчивости морфометрии карстовых форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Andreychuk V.N.* Provaly nad gipsovymi peshcherami-labirintami i otsenka ustoychivosti zakarstovannykh territoriy [Sinkholes under gypsum caves-labyrinths and estimation of sustainability of karst territories]. Chernovtsy: Prut, 1999. 52 s. (Rus.).
2. *Anikeev A.V.* Provaly i osedanie zemnoy poverkhnosti v karstovykh rayonakh: modelirovanie i prognoz [Sinkholes and subsidence of surface in karst areas: modeling and prognosis]: avtoref. dis. ... d-ra geol.-miner. Nauk. M., 2014. 47 s. (Rus.).
3. *Gotman N.Z., Vagapov R.R.* Proektirovanie geotekhnicheskoy protivokarstovoy zashchity zdaniy i sooruzheniy [Design of geotechnical buildings and structures karst protection] // *Ekologicheskaya bezopasnost' i stroitel'stvo v karstovykh rayonakh: materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma / pod red. V.N. Kataeva, D.R. Zolotareva, S.V. Shcherbakova, A.V. Shilovoy.* Perm': Perm. gos. nats. issled. un-t, 2015. S. 229–233. (Rus.).
4. *Dublyanskaya G.N., Dublyanskiy V.N.* Kartografirovaniye, rayonirovaniye i inzhenerno-geologicheskaya otsenka zakarstovannykh territoriy [Cartography, zoning and engineering-geological estimation of karst territories]. Novosibirsk: Izd-vo RAN, 1992. 143 s. (Rus.).
5. *Erofeev E.A., Kataev V.N.* Primeneniye veroyatnostno-statisticheskikh metodov otsenki karstovoy opasnosti v usloviyakh tekhnogenogo vozdeystviya na zakarstovannyye territorii [Using probabilistic and statistical methods for estimating karst hazards under conditions of anthropogenic influence on karst areas] // *Inzhenernaya geologiya.* 2010. № 4. S. 34–46. (Rus.).
6. *Kataev V.N.* i dr. Monitoring zakarstovannykh territoriy Permskoy oblasti (2006–2010) [Monitoring of karst on the territory of Permsky kray (2006–2010)]. Otchet o NIR po gosudarstvennomu kontraktu №4 ot 15.02.2006. GOU VPO «Permskiy gosudarstvennyy universitet». Perm', 2010. (Rus.).
7. *Kataev V.N., Shcherbakov S.V., Zolotarev D.R., Likhaya O.M., Kovaleva T.G.* Osobennosti geologicheskogo stroeniya territorii i prostranstvennoye raspredeleniye karstovykh form (na primere territorii g. Kungur) [The features of geologic structure of territory and spatial distribution of karst forms (on an example of Kungur territory)] // *Vestnik Permskogo universiteta.* Perm': Izd-vo Permsk. un-ta, 2009. Vyp. 3. S. 77–93. (Rus.).
8. SP 11-105-97. Inzhenerno-geologicheskkiye izyskaniya dlya stroitel'stva. Ch. II. Pravila proizvodstva rabot v rayonakh razvitiya opasnykh geologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh protsessov [SP 11-105-97. Engineering geological site investigations for construction]. M.: Gosstroy Rossii, 2000. (Rus.).
9. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83* [SP 22.13330.2011. Foundations of buildings and structures. Actualized edition of SNIP 2.02.01-83*]. M.: OAO «TsPP», 2011. 166 s. (Rus.).
10. *Tolmachev V.V., Troitskiy G.M., Khomenko V.P.* Inzhenerno-stroitel'noye osvoeniye zakarstovannykh territoriy [Engineering and construction development of karst territories]. M.: Stroyizdat, 1986. 176 s. (Rus.).
11. *Tolmachev V.V., Royter F.* Inzhenernoye karstovedeniye [Karst engineering]. M.: Nedra, 1990. 151 s. (Rus.).
12. *Khomenko V.P.* Karstovoye provaloobrazovaniye: mekhanizm i otsenka opasnosti [Collapse sinkholes formation: mechanisms and hazard assessments] // *Ekologicheskaya bezopasnost' i stroitel'stvo v karstovykh rayonakh: materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma / pod red. V.N. Kataeva, D.R. Zolotareva, S.V. Shcherbakova, A.V. Shilovoy.* Perm': Perm. gos. nats. issled. un-t, 2015. S. 50–60. (Rus.).
13. *Shcherbakov S.V.* Fizicheskiye svoystva chetvertichnykh dispersnykh otlozheniy i ikh vliyaniye na aktivnost' karsta [Physical properties of quaternary disperse soils and its influence on karst activity] // *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala: materialy region. nauch.-prakt. konf.* Perm': Perm. un-t, 2010. S. 265–268. (Rus.).
14. *Shcherbakov S.V.* Metodika izucheniya vzaimosvyazey mezhdru karstovymi formami i prirodnyimi usloviyami territoriy [Technique of relationships analysis between karst forms and natural conditions of territories] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya.* 2012. № 5. URL: www.science-education.ru/105-7232 (data obrashcheniya: 23.10.2012). (Rus.).
15. *Shcherbakov S.V.* Pokazateli-factory razvitiya karsta pri kompleksnoy otsenke karstoopasnosti territoriy [Factors of karst development in integral estimation of the karst hazard] // *Gidrogeologiya i karstovedeniye: Mezhdvuz. sb. nauch. tr.* Perm': Perm. gos. nats. issl. un-t, 2013. Vyp. 19. S. 261–268. (Rus.).
16. *Shcherbakov S.V.* Otsenka aktivnosti i masshtabov razvitiya karsta na territoriyakh Permskogo Predural'ya po dannym izucheniya ikh prirodnogo stroeniya [Estimation of activity and scales of karst development on the territories of Perm Ural based on its natural conditions] // *Sergeevskie chteniya: materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geokologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii (21 marta 2014 g.).* M.: RUDN, 2014. Vyp. 16. S. 645–650. (Rus.).
17. *Shcherbakov S.V.* Normalizatsiya dannykh pri karstologicheskikh issledovaniyakh [Normalization of data in karst analysis] // *Nauka, obrazovaniye, obschestvo: problemy i perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 28 fevralya 2014 g.: v 12 chastyakh. Chast' 10.* Tambov: Izd-vo TROO «Biznes-Nauka-Obshchestvo», 2014. S. 161–162. (Rus.).
18. *Shcherbakov S.V., Kataev V.N.* Mekhanicheskiye svoystva dispersnykh gruntov territorii g. Kungur i ikh vliyaniye na aktivnost' karsta [Mechanical properties of disperse soils, located on Kungur territory, and its influence on karst activity] // *Geotekhnicheskiye problemy proektirovaniya zdaniy i sooruzheniy na karstoopasnykh territoriyakh: materialy Rossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (22–23 maya 2012 g., g. Ufa).* Ufa: BashNIIsroy, 2012. S. 252–262. (Rus.).
19. *Kaufmann O., Quinif Y.* Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the «Tournaisis» area, Southern Belgium // *Environmental Geology.* 2002. № 65. P. 117–124.
20. *Shcherbakov S.V.* Modern approach to an assessment of karst hazard // *Global View of Engineering Geology and the Environment: proceeding of the International symposium and 9th Asian Regional conference of IAEG, Beijing, China, 23–25 September 2013.* CRS Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013. P. 867–872.
21. *Shcherbakov S.* Parametric ratio of relief elements and karst forms // *14th GeoConference on Science and Technologies in geology, exploration and mining (17–26 June, 2014, Albena, Bulgaria).* Conference Proceedings, Volume II. Hydrogeology, Engineering geology and Geotechnics. SGEM-2014. P. 699–706.