

Покровная толща карстовых массивов: изучение в целях карстологического прогноза

Е.В.Дробинина^{1,2}, В.Н.Катаев¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Россия)

²Пермский филиал ООО «Противокарстовая и береговая защита» (Дзержинск Нижегородской обл., Россия)

Проведенные исследования в теоретическом плане направлены на развитие системного подхода к изучению карстовых массивов — геологических тел, которые обладают конкретной структурой (набором элементов и их взаимодействием). Толща покровов над растворимыми породами, как структурный элемент карстового массива, реагирует на возникновение и изменения параметров «элементов ослабления» в карстующейся толще. В качестве элементов ослабления рассмотрены карстовые полости, зоны дробления и дезинтеграции в коренных растворимых породах. Установлено, что наиболее отчетливо свойства перекрывающей толщи изменяются над полостями, достигшими критических поперечных размеров, при которых нарушается равновесие между удерживающими и сдвигающими силами и происходит обрушение свода полости. Индикатором наличия карстовых полостей, размер которых не достигает критического, служат участки покровов с аномальными значениями физико-механических свойств. Последние пространственно коррелируют с участками изменения напряженно-деформированного состояния в карстующемся пласте вблизи карстовой полости и над ней. На конкретном примере показано, как влияет карстовая полость (до момента достижения ею критического пролета) на свойства покровной толщи.

Ключевые слова: карстовый массив, перекрывающая толща, физико-механические свойства, карстологический прогноз, элементы ослабления, компьютерное моделирование.

В нормативных документах по инженерно-геологическим изысканиям* выделяются два типа карста: открытый — карстующиеся (растворимые) породы выходят на поверхность или покрыты лишь почвенно-растительным слоем, покрытый — карстующиеся породы покрыты сверху некарстующимися (нерастворимыми) отложениями.

* См., например: СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч.1. Общие правила производства работ. Дата введения 1998-03-01. С.17; Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. ТСН 22-308-98 НН. Нижний Новгород, 1998. С.3.



Елена Викторовна Дробинина, инженер научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного национального исследовательского университета, инженер-геолог Пермского филиала ООО «Противокарстовая и береговая защита». Область научных интересов — геология, инженерная геология, карстогенез.
e-mail: alenadrobina@yandex.ru



Валерий Николаевич Катаев, доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан геологического факультета, заведующий кафедрой динамической геологии и гидрогеологии, научный руководитель той же лаборатории того же университета. Область научных интересов — геология, гидрогеология, карстогенез, структурно-тектонический анализ карстовых массивов, динамические процессы в геологии.
e-mail: kataev@psu.ru

Г.Н. и В.Н.Дублянские, создавая карты распространения карста на территории СССР и карты карстовой опасности на территории России, предложили выделять для инженерно-геологических целей четыре основных и один дополнительный типы карста: открытый, когда карстующиеся породы выходят на поверхность или покрыты осадочными несцементированными отложениями мощностью до 2 м; покрытый — карстующиеся породы покрыты осадочными несцементированными отложениями мощностью более 2 м; перекрытый — карстующиеся породы перекрыты сцементированными осадочными, магматическими или метаморфическими породами различной мощности; перекрыто-покрытый — карстующиеся породы перекрыты осадочными несцементированными и осадочными сцементированными, магматическими или метаморфическими породами различной мощности; смешанный — распространенный в долинах рек с чередованием участков развития карста разных типов [1].

Площадь регионов, в геологическом строении которых участвуют карстующиеся породы различного возраста (от архей-протерозойских до неогеновых) в пределах Российской Федерации суммарно занимает более 66%. При этом 85.6% из них приходится на покрытый и перекрыто-покрытый типы карста [2, 3].

Теория изучения сложных геологических систем, к которым, несомненно, относится карстовый массив, свидетельствует о том, что природная (а тем более природно-техническая) система, не может быть проанализирована простыми аналитическими методами, а именно расчленением целого на части и их раздельным изучением. Исследование динамики карстового массива и прогнозирование его поведения необходимо вести с учетом целостности этого сложного объекта.

Системный подход при анализе карстового массива предусматривает решение триединой задачи:

- изучение массива как объемной разноуровневой структурно-тектонической системы, которая характеризуется геодинамическими процессами, имеющими не только природные, но и техногенные причины возникновения и развития;
- создание концептуальных моделей по взаимодействию элементов массива (от микро- до макроуровня), отражающих реальное развитие процессов в различных геоструктурных обстановках;
- создание системы по прогнозу интенсивности и направленности карстового и сопутствующих ему процессов.

Иными словами, системный подход к изучению карста предполагает учет природных и техногенных изменений на различных иерархических уровнях всего комплекса структурных элементов. Именно по этой причине исследование перекрыва-

ющей толщи как элемента карстового массива, которая характеризуется определенным набором структурно-тектонических, геологических и гидрогеологических особенностей, требует знаний о взаимоотношении между ее составными элементами. Данные работы становятся особенно актуальными, когда решаются вопросы прогнозирования образования провалов в условиях покрытого или перекрыто-покрытого карста, т.е. в условиях недостатка или отсутствия сведений о поверхностных проявлениях карста, таких как локальные оседания или воронки [4].

Проблемам строения грунтовых покровов в пределах карстовых массивов и их влиянию на проявления карста провального типа посвящены многочисленные публикации как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе. В большинстве из них описывается типизация строения толщи покровов или влияние их мощности на интенсивность образования карста [1, 5–7].

Вместе с тем вопрос о пространственно-временной связи особенностей покровных отложений и ослабленных структур (полостей, зон дробления или системных трещин) в карстующейся толще, особенно в ее прикровельной части, не получил окончательного ответа. Сегодня в инженерном карстоведении применяются геомеханические модели основных генетических типов провалов. В таких моделях среди параметров, входящих в расчетные схемы, используются данные о прочностных свойствах грунтов и их природной плотности, фильтрационные характеристики слоев грунтовой толщи и др. Применяя данные схемы, исследователь имеет возможность устанавливать линейные размеры карстовых деформаций (диаметры провалов, предельные радиусы полостей). Анализируя строение грунтовой толщи и обводненности покровов, в которых возникают различные генетические типы провалов, при инженерно-геологических изысканиях можно выявить ранние признаки их образования [8–11]. Более того, на сегодняшний день проработаны и верифицированы на конкретных геологических объектах различные методические приемы прогнозирования пространственной взаимосвязи между ослабленными зонами в карстующейся толще и участками в покровных отложениях с аномальным изменением физико-механических свойств. Например, методика оценки карстоопасности, предлагаемая В.С.Крашениниковым, основана на выявлении ранних признаков формирования карстовых провалов [12, 13]. Установление ранних признаков производится при комплексном анализе результатов палеогеоморфологических исследований (выявление погребенных карстовых форм), оценки степени суффозионности грунтов и статического зондирования (установление аномальных по плотности зон).

Мы изучали изменение свойств покровных грунтов над полостями, зонами дробления и вблизи провалов в регионах развития сульфатно-карбонатного карста в Пермском крае. Нами применялся массовый статистический анализ данных по распространению карстовых форм, геолого-гидрогеологическому, инженерно-геологическому строению исследуемых участков (по материалам бурения), а также по свойствам грунтов и карстующихся пород [14, 15].

В результате проведенных исследований были установлены принципиальные статистические распределения и зависимости между деформационно-прочностными свойствами дисперсных грунтов покровной толщи и развитием карста на данной территории. Сейчас очевидно, что наличие карстовых полостей и зон дробления на контакте с нерастворимыми перекрывающими отложениями или в толще растворимых пород обуславливает локальные изменения прочностных свойств покровов.

Перекрывающая толща — структурный элемент карстового массива

Карстологическое прогнозирование должно сопровождаться определением условных границ, внутри которых проводятся необходимые исследования и которые, как правило, зависят от цели прогнозных мероприятий.

Так, на локальном уровне в структуре карстового массива можно ограничиться выделением трех взаимовлияющих элементов: перекрывающей толщи, карстующихся пород (как среды развития элементов ослабления карстового массива) и непосредственно элементов ослабления, которые изменяют естественное напряженно-деформационное состояние вмещающих грунтов (вплоть до образования необратимых деформаций выше по разрезу).

Понятие «элементы ослабления карстового массива» введено в инженерном карстоведении довольно давно. Под ними понимаются зоны с высокой плотностью системных трещин, области

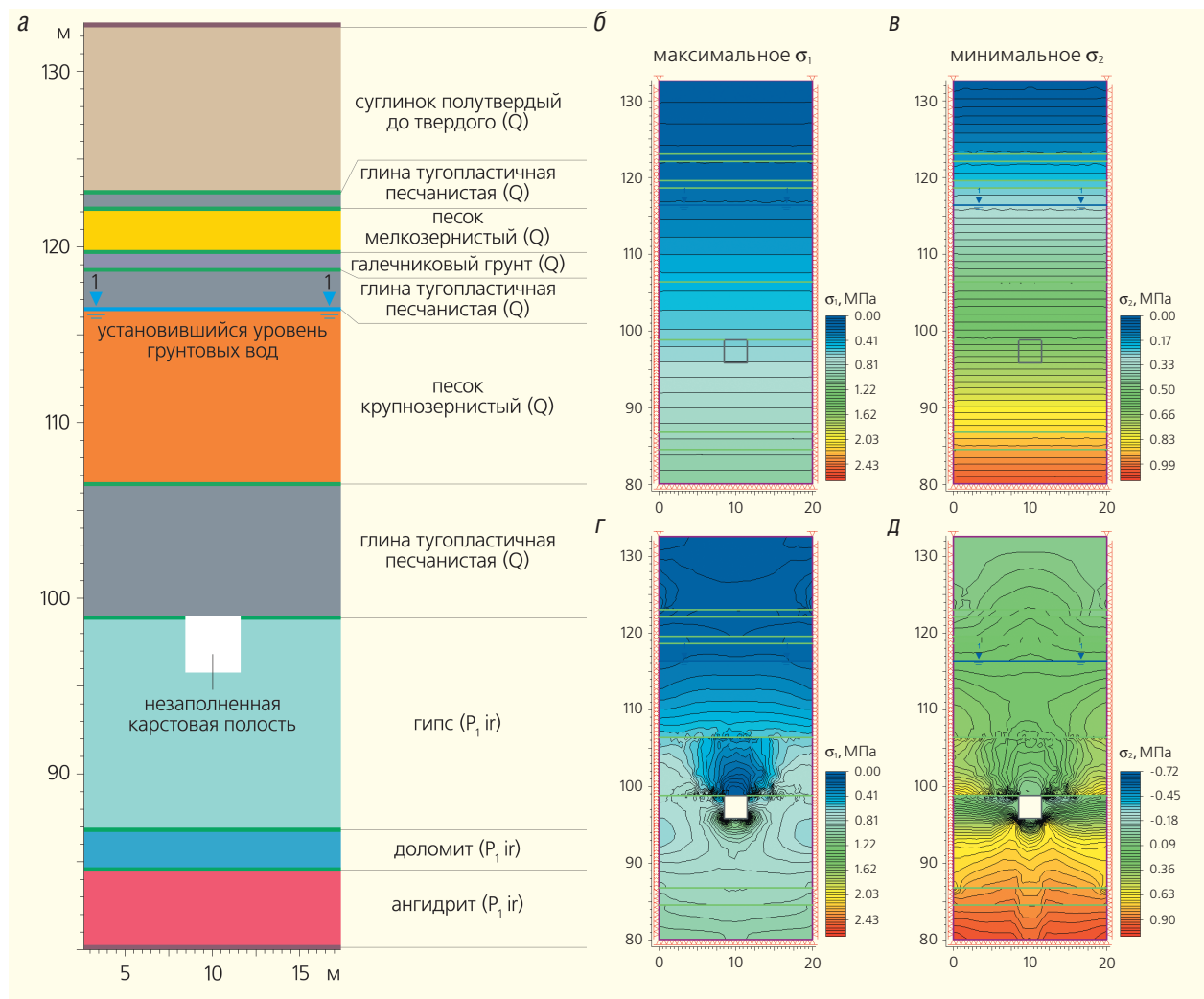


Рис. 1. Компьютерное моделирование напряженного состояния грунтовой толщи в типовой скважине: а — типовая модель карстового массива; б, в — главные напряжения в условиях отсутствия элементов ослабления карстового массива; г, д — главные напряжения при наличии в кровельной части карстующихся пород незаполненной карстовой полости.

дробления, разломы, полости и полостные системы, зоны интенсивной кавернозности. Как показывает практика, эти элементы наиболее динамичны в гидрогеологическом и гидрохимическом отношениях, а следовательно, представляют потенциальную опасность потери устойчивости карстового массива [16–18].

На рис.1 представлена типовая компьютерная модель напряженного состояния грунтовой толщи, которая демонстрирует влияние незаполненной карстовой полости на вышележащие отложения. Моделирование произведено методом конечных элементов с использованием программного обеспечения Rocscience Phase 2.

При изучении влияния элементов ослабления на перекрывающую толщу целесообразно обращать особое внимание на прикровельную часть карстующихся пород и перекрывающие грунты.

В классическом карстоведении прикровельная часть карстующихся пород соответствует приповерхностной [19], или эпикарстовой зоне [20–22] — геологической среде, в пределах которой наблюдаются локальные изменения перекрывающих нерастворимых пород. Для инженерно-геологической характеристики закарстованности в приповерхностной зоне Дублянские выделили пять подзон ослабления прочности в геологическом строении карстового массива: дезинтеграцию, кавернозность, закарстованность (наличие полостей с разной степенью заполнения), разуплотнение и брекчирование [23]. Все эти формы нарушения сплошности определяют состояние геологической среды.

На рис.2 показано расположение в различных карстовых массивах элементов ослабления, влияющих на свойства вмещающих и перекрывающих отложений [24].

Перекрывающая толща грунтов относительно доступна для изучения элементов карстового массива как прямыми, так и косвенными методами. Ее мощность, состав и состояние во многом определяют избирательное возникновение и развитие процессов суффозионного разрушения грунтов, активность и избирательность растворения нижележащей (карстующейся) толщи и, как следствие, вероятность и механизм образования провалов.

Как правило, в областях развития сульфатно-карбонатного карста, где мощность перекрывающих отложений более 50 м, распространение карстовых форм ограничено. Относительно высокая степень проявления карста характерна для территорий, на которых мощность покровов составляет от 15 до 40 м (рис.3). Кроме того, области карстующихся пород, перекрытые песчаными отложениями, в карстологическом отношении более опасны, чем территории, сложенные растворимыми породами, которые перекрыты глинами или суглинистыми отложениями (рис.4).

Часто с увеличением мощности перекрывающей толщи снижается вероятность формирования провалов. Эта тенденция определяется как минимум двумя факторами: ограничением инфильтрации атмосферных осадков в карстующиеся отложения и постепенным затуханием вверх по разрезу деформаций грунтов над сводом полости. Однако сведе-

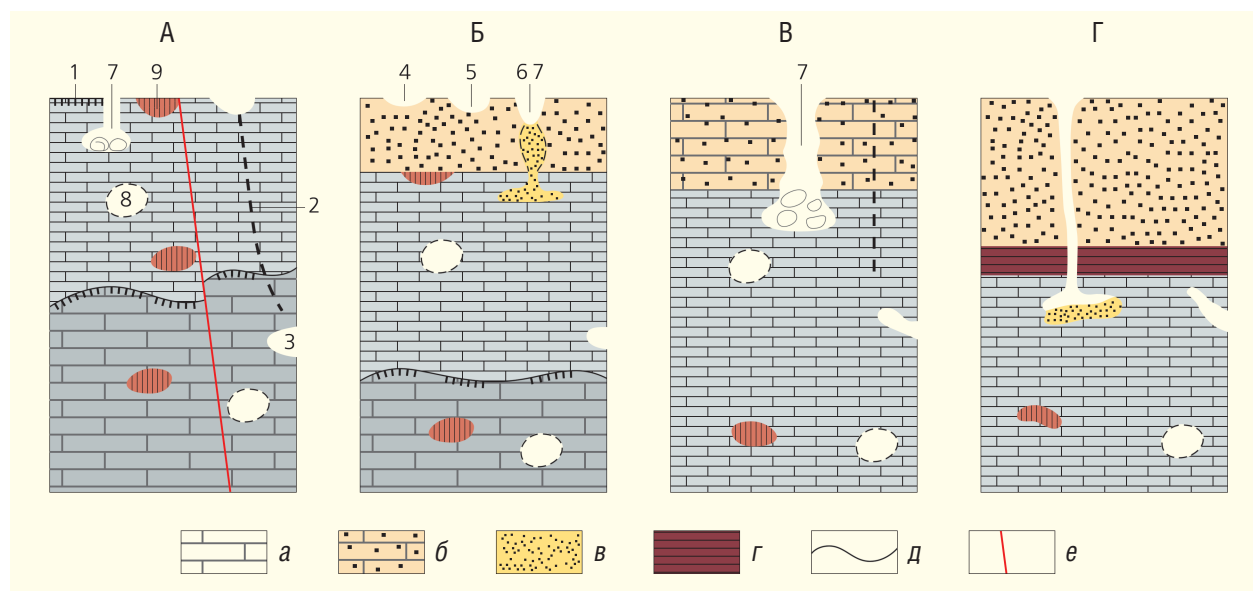


Рис.2. Расположение элементов ослабления в карстовых массивах [24]. Типы карста: А — открытый, Б — покрытый, В — перекрываемый, Г — перекрываемо-покрытый; породы: а — известняки, б — песчаники, в — пески, г — аргиллиты; д — стратиграфические несогласия, е — тектонические нарушения; карстопоявления: 1 — современный и погребенный карбонатный элювий, 2 — трещины отседания, расширенные растворением, 3 — карстовые ниши, 4 — впадины, 5 — мульды, 6 — просадки, 7 — провалы, 8 — образование полости, 9 — заполнитель полости.

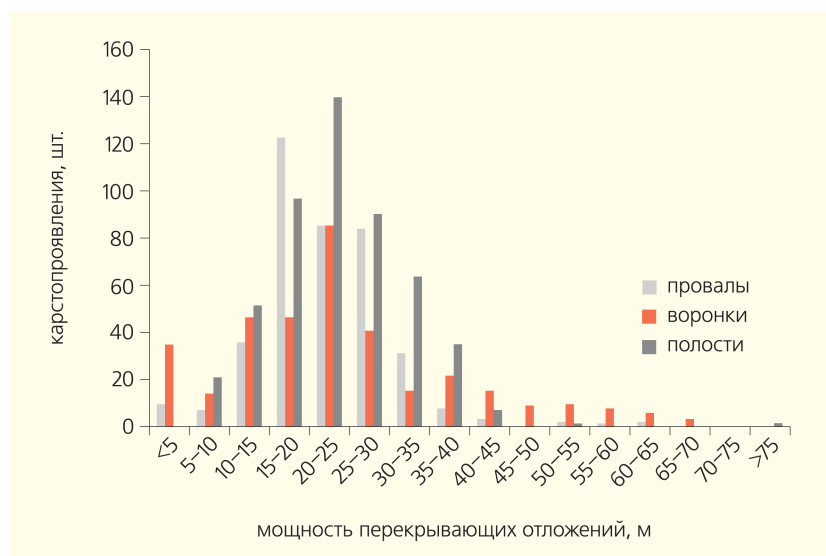


Рис.3. Частота встречаемости карстовых форм в зависимости от мощности перекрывающих отложений (Нижнесылвинский район сульфатно-карбонатного карста, Пермский край).

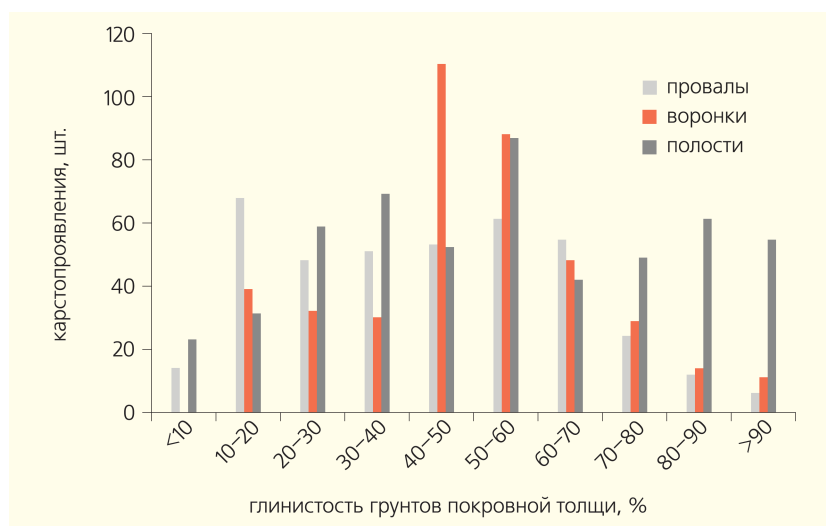


Рис.4. Частота встречаемости карстовых форм на территориях с разными показателями глинистости перекрывающих отложений (Нижнесылвинский район сульфатно-карбонатного карста, Пермский край).

ние изучения покровной толщи только к анализу ее мощности может привести к получению неверных заключений о карстоопасности территории.

Яркий пример развития карстового процесса в массиве со значительной мощностью перекрывающих отложений — территория Республики Татарстан, севернее г.Зеленодольска. Там карстовый процесс развивается на глубинах более 70 м вследствие отсутствия водоупорного слоя между песчаной толщей неоген-четвертичного возраста и сульфатными породами пермской системы.

При наличии глинистого прослоя в основании песчаной толщи или когда перекрывающая толща сложена глинистыми грунтами, превалирующим

механизмом формирования провальной воронки выступает гравитационное обрушение; если же перекрывающая толща представлена песками, то таким механизмом становятся сдвигание и истечение водонасыщенных песков в карстовую полость или в трещину в водоупоре. Если перекрывающие отложения сложены переслаивающимися песками и глинистыми грунтами, в образовании провалов участвуют процессы как обрушения, так и сдвигания частиц грунта под действием силы тяжести. В первом случае образуются провалы карстово-обвального типа, во втором — карстово-суффозионного, в третьем — смешанного [25]. В качестве примера приведем сведения о строении двух участков в районе карбонатно-сульфатного карста во Владимирской (Пивоваровский карстовый участок) и в Нижегородской (Дзержинский карстовый участок) областях (рис.5).

Анализ строения перекрывающих толщ позволяет предположить преимущественное развитие провалов карстово-обвального типа на Пивоваровском участке и карстово-суффозионного типа — на Дзержинском. При наличии глинистого прослоя в основании песчаной толщи над полостями, достигшими критического (для конкретных геологических условий) поперечного размера, при котором теряется устойчивость свода полости, также образуются провалы карстово-обвального типа. В геологическом разрезе Дзержинского участка присутствуют суффозионно-неустойчивые грунты, и велика вероятность формирования здесь карстово-суффозионных просадок грунтовой толщи вследствие неравномерной трещиноватости глинистого водоупора.

Дополнительно отметим, что проницаемость перекрывающей толщи влияет на интенсивность растворения подстилающих карстующихся пород. А.И.Печеркин сравнил карты изогипс кровли пермских растворимых сульфатных пород на территориях Пермской обл. (ныне края) и Самарской обл. Оказалось, что расчлененность (амплитуда изменения абсолютных отметок) рельефа кровли карсту-

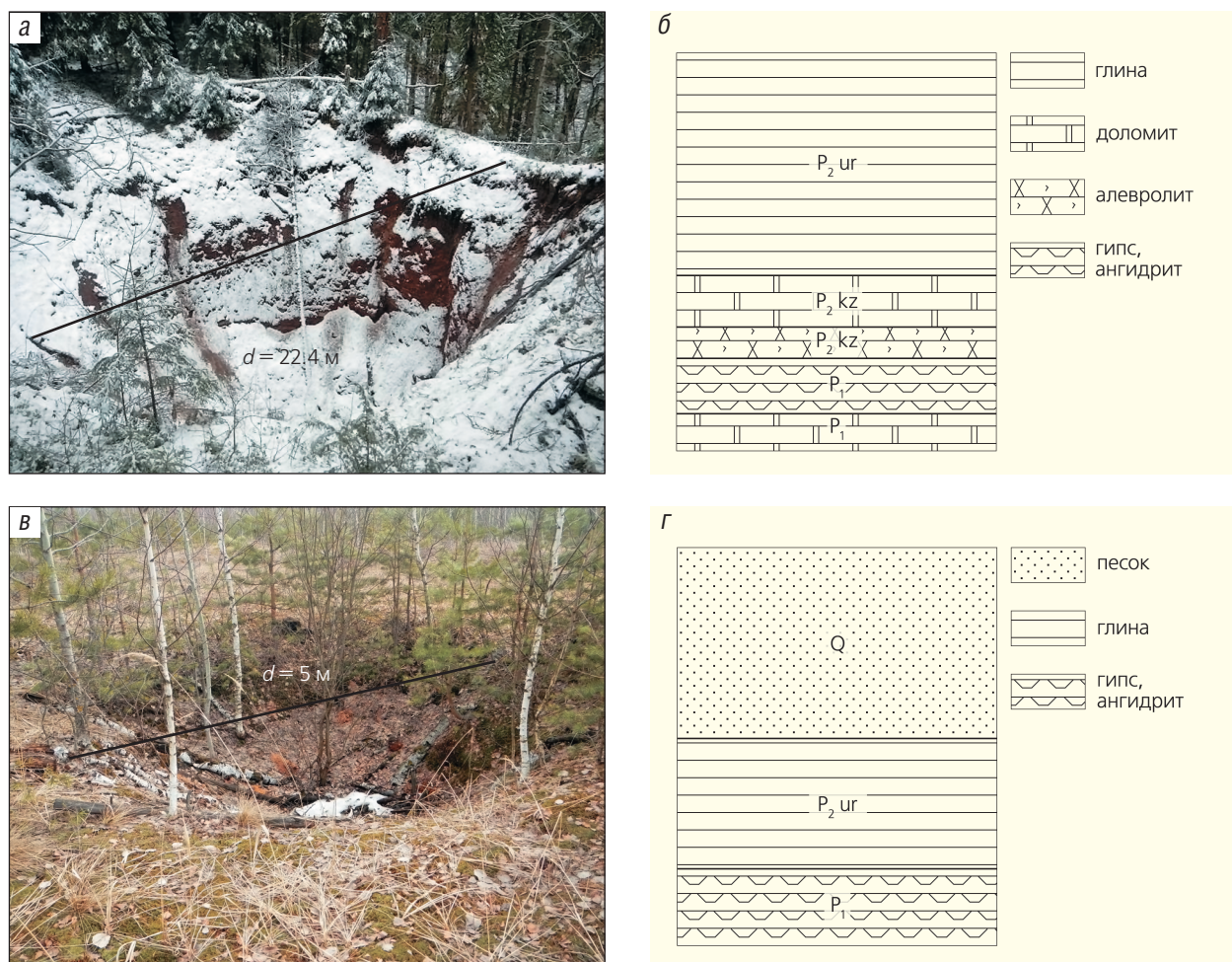


Рис.5. Поверхностное проявление карстового процесса (а, в) и сводный геологический разрез (б, г) территорий Пивоваровско-го (вверху) и Дзержинского карстовых участков.

ющихся отложений определяется различной проницаемостью перекрывающей толщи. Так, величина данного параметра в Пермской обл. (крае) составляет 15–20 м, а в Самарской — более 30 м. В первом случае перекрывающая толща представлена плотными глинами и суглинками, во втором — песчано-суглинистыми отложениями [26].

В условиях приближения к неравновесному состоянию, которое обусловлено формированием полостей в карстовом массиве, покровная толща ведет себя как диссипативная система, способная к самоорганизации посредством создания деформационных структур [8]. Таким образом, формирование элемента ослабления в толще карстующихся пород приводит к изменению состояния и прочностных свойств грунтов в сводовой части, что связано с разгрузкой напряжений в точке ослабления карстового массива. При этом происходит деформация покровной толщи, вплоть до образования на поверхности провальной воронки.

Неупругие деформации, определяющие образование провальных воронок, возникают в результате формирования карстовых полостей с критически-

ми поперечными размерами, при которых их свод обрушается. Индикатором же наличия карстовых полостей меньшего размера могут служить зоны с аномальными значениями физико-механических параметров перекрывающих отложений.

Данная идея основана на том, что карстовый массив представляет собой часть геологической среды. Он наделен ее фундаментальными свойствами, такими как изменчивость, неоднородность, дискретность и др. Изменчивость массива отражает его способность к развитию. Она порождает неоднородность физико-механических, водных и других свойств пород в различных точках массива. Дискретность, которая выражается наличием пор, пустот, трещин, тектонических нарушений слагающих пород, также представляет собой результат развития карстового массива. Все его свойства своим появлением обязаны общему для литосферы процессу литогенеза, который контролирует седиментацию, формирование пород, а затем их разрушение или трансформацию.

Таким образом, возникновение и последующее формирование элементов ослабления обуславлива-

ет сингенетические и постгенетические преобразования не только во вмещающих породах, но и в перекрывающей толще грунтов. Это выражается в возникновении локальных участков покровов с аномальными показателями физико-механических свойств грунта относительно их фоновых значений.

Интенсивность изменения исследуемого параметра будет тем выше (и, следовательно, его будет легче выявить при инженерных изысканиях), чем выше его градиент (т.е. величина приращения его значений при одном и том же расстоянии между точками опробования) [27]. Установление распределения по площади градиентов аномалий физико-механических свойств в перекрывающей толще позволит выделять участки потенциального влияния на грунт элементов ослабления карстового массива.

Изучение перекрывающей толщи в целях карстологического прогноза

Опасность присутствия элементов ослабления в карстовом массиве заключается главным образом в спонтанном обрушении грунтов перекрывающей толщи в карстовую полость. Это может происходить вследствие увеличения при растворении до критических размеров существующих полостных форм и дизъюнктивов. Наиболее верный способ оценки подземной закарстованности массива — прямые наблюдения при бурении. Однако зачастую экономически целесообразная густота сети карстологических выработок недостаточна для достоверной оценки такой опасности.

Невозможность непосредственного наблюдения за развитием карстового процесса на глубине определяет необходимость выявления более или менее общих закономерностей его протекания [28].

Кроме того, несомненно, надо учитывать и возникающие эффекты в покровной толще. Развитие полостей в растворимых породах происходит в течение времени, достаточного для формирования некоторых признаков образования провалов. Распознавание этих признаков, безусловно, повышает объективность оценки карстовой опасности территории, особенно в случае отсутствия на ней поверхностных форм карста [9].

В силу литологической неоднородности перекрывающей толщи ее исследование требует предварительной схематизации геологического разреза. Многокомпонентный состав грунтов и их высокая чувствительность к внешним факторам обуславливают вариативность значений физико-механических характеристик даже в пределах относительно небольшого объема грунта одного и того же генезиса, подвида или разновидности*. Построение расчетной схемы (модели) перекрывающей

толщи без предварительного разделения на элементы может привести к ошибочным результатам из-за малой чувствительности такой модели к изменению параметров именно над карстовыми полостями. Иными словами, предварительная схематизация геологического разреза позволит повысить однородность исследуемых элементов, в пределах которых выделение участков с отличными от фоновых характеристиками будет сопряжено с меньшими трудностями.

Вовлечение в хозяйственное освоение карстовых массивов определяет практический интерес к данной проблеме. Целесообразно проводить схематизацию геологического разреза перекрывающей толщи, применяя классификацию грунтов, которая используется при инженерно-геологических изысканиях и инженерно-карстологических исследованиях.

Изучение именно дисперсных грунтов в карстологическом прогнозе рационально с той точки зрения, что они характеризуются широким распространением, меньшей прочностью и относительно высокой водопроницаемостью. Эти грунты наиболее подвержены влиянию внешних факторов, что отличает их от скальных пород. Последние при значительной мощности и малой трещиноватости играют роль весьма прочного водоупора, который не только предотвращает образование провалов над карстовой полостью, но и ингибирует карстовый процесс вследствие слабого доступа пресных вод в толщу растворимых пород.

Физико-механические свойства перекрывающей толщи

Закономерности провалообразования (и в первую очередь — деформация покровной толщи карстовых массивов) определяются свойствами слагающих грунтов и их напряженным состоянием [8, 29]. Особо следует обращать внимание на такие параметры, характеризующие свойства перекрывающих пород, как плотность грунта ρ , коэффициент пористости e , угол внутреннего трения ϕ и удельное сцепление C . Они достаточно полно характеризуют прочностные свойства и сопротивляемость внешним воздействиям, т.е. прямо или косвенно определяют способность перекрывающей толщи противостоять обрушению грунтов в карстовую полость. Кроме того, современная нормативная база, используемая при производстве инженерно-геологических изысканий, обязывает проводить лабораторные исследования для получения перечисленных характеристик.

Интерес к исследованию прочностных свойств обусловлен тем, что именно они определяют характер и силу взаимодействия частиц и поведение грунтовой толщи над элементом ослабления кар-

* ГОСТ 25100–2011. Приложение Б, В.

стового массива. Глинистые грунты с высокой прочностью, наряду с ограничением поступления пресных вод в толщу карстующихся отложений, препятствуют обрушению перекрывающей толщи. Песчаные грунты в сухом состоянии в силу отсутствия сцепления между частицами осыпаются (или в водонасыщенном состоянии истекают) в карстовую полость или трещину под действием силы тяжести в соответствии с углом внутреннего трения. Его значения в водонасыщенных грунтах близко к нулю. Влажные пески приобретают незначительное сцепление между отдельными частицами, обусловленное поверхностным натяжением воды в порах на границе твердой, жидкой и газообразной сред. Обрушение песчаных масс происходит в виде компактных тел, ограниченных сверху параболическими сводами [30].

Состояние грунтовой толщи характеризуется плотностью и пористостью, которыми определяется площадь соприкосновения и количество контактов между твердыми частицами грунта. Следовательно, увеличение последних прямо пропорционально трению между грунтовыми частицами (для несвязных отложений) и их сцеплению (для связных), и наоборот.

Влажность, как числовой параметр, характеризующий свойства перекрывающих отложений, в данной работе не рассматривается вследствие ее сезонной изменчивости. Однако мы опосредованно ее учитываем, определяя консистенцию глинистых пород.

Дисперсные грунты, представляющие собой многокомпонентные системы, обладают динамичностью свойств. Пространственно-временная изменчивость физико-механических параметров грунтов дисперсной перекрывающей толщи, по сути, — отражение поступательного развития полостного пространства в толще карстующихся пород.

Компьютерное моделирование

С помощью компьютерного моделирования проследим влияние вариации размеров предполагаемых карстовых полостей на состояние перекрывающей толщи (рис.6). Строение и физико-механические свойства грунтовой толщи приведены по конкретному геологическому разрезу, вскрытому скважинами, которые расположены в 28 км восточнее Москвы и в 6 км юго-западнее Ногинска, недалеко от дер.Аксено-Бутырки. Глинистый водоупор здесь

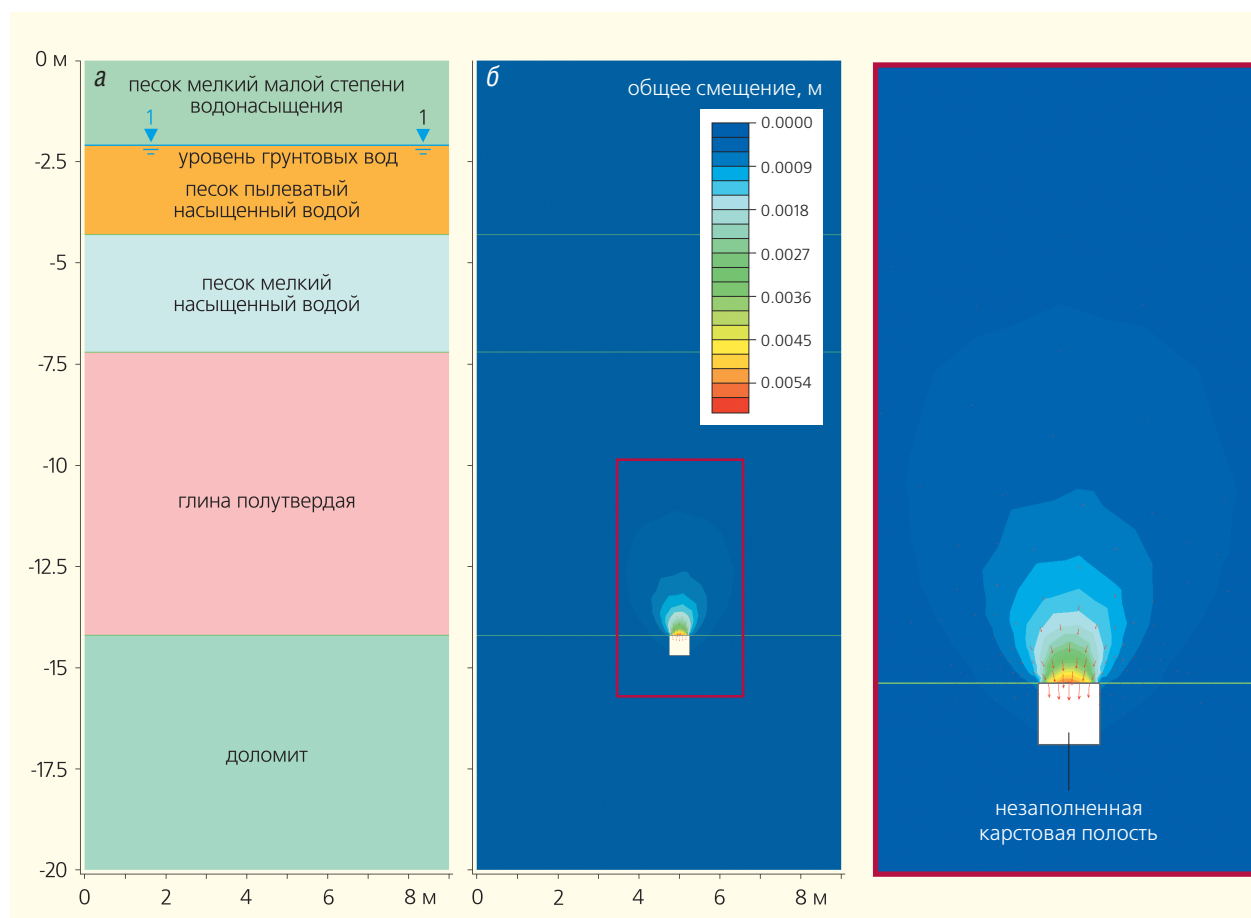


Рис.6. Грунтовая модель геологического разреза (а) и компьютерная модель поведения грунта над карстовой полостью диаметром 0.5 м (б). Красные стрелки — векторы деформации грунтов над карстовой полостью (масштаб 25:1).

Таблица

Исходные параметры для компьютерного моделирования

Грунты перекрывающей толщи	Физико-механические свойства				
	плотность грунта ρ , г/см ³	модуль общей деформации E , МПа	угол внутреннего трения ϕ , град.	удельное сцепление C , МПа	коэффициент Пуассона ν
Песок мелкий малой степени водонасыщения	2.00	36.6	34.2	0.002	0.30
Песок пылеватый, насыщенный водой	2.03	35.3	31.2	0.002	0.31
Песок мелкий, насыщенный водой	2.00	36.2	32.5	0.002	0.30
Глина полутвердая	1.81	23.6	15.3	0.062	0.33

Угол дилатансии вычисляется по следующим приближительным зависимостям:

 $\psi = 0.666\phi$ — для песчаных грунтов, $\psi = 0.333\phi$ — для глинистых грунтов.

сложен юрскими темноцветными глинами. Толща песков представлена комплексом юрско-меловых и четвертичных аллювиальных отложений. Элементы ослабления скважинами не вскрыты.

Для того чтобы оценить влияние элементов ослабления (размером от 0 до 5.0 м) на перекрывающую толщу, мы провели компьютерное моделирование поведения грунта по модели Кулона—Мора. Данная модель требует введения пяти исходных параметров: модуля общей деформации E , коэффициента Пуассона ν , удельного сцепления C , угла внутреннего трения ϕ и угла дилатансии ψ (табл.). Такое моделирование предполагает смещение вышележащих грунтовых масс в полость по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения с формированием на земной поверхности конусовидной деформации.

В результате стадийного моделирования с постоянным увеличением диаметра элемента ослаб-

ления на 0.5 м была получена графическая зависимость общей деформации грунтов от диаметра полости: на границе песок—глина; на границе мелко-го песка малой степени водонасыщения и пылеватого песка, насыщенного водой; по линии поверхности земли (рис.7).

Сначала в грунтовой толще над элементами ослабления карстового массива наблюдалось постепенное увеличение деформаций грунтов — до определенного момента, когда произошел скачок их значений (при ширине полости 4.0–5.0 м), отвечающий резкому увеличению деформаций до улавливаемых даже невооруженным глазом.

Так, пока диаметр полости был меньше 4.0 м, деформация во всех исследуемых точках карстового массива не превышала 0.5 см. При диаметре карстовой полости 4.0–5.0 м деформация кровельной части глинистого водоупора составляла уже 10 см, деформация земной поверхности — 3.0 см.

* * *

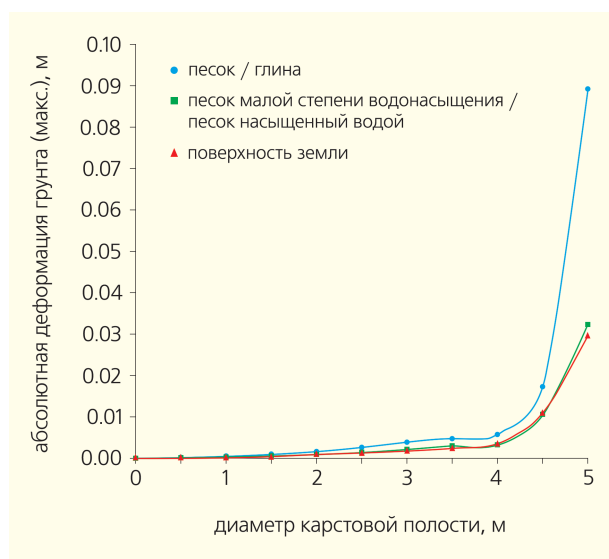


Рис.7. График зависимости абсолютной деформации грунтов перекрывающей толщи от ширины элемента ослабления карстового массива.

Таким образом, элементы ослабления оказывают влияние на перекрывающие грунты до момента достижения карстовой полостью критического размера и до начала образования провала. Это выражается в появлении незначительных по величине деформаций (см. рис.6,б).

Наиболее явно на перекрывающую толщу влияют элементы ослабления, достигшие критического размера, над которыми в грунтах в соответствии с меняющимися физико-механическими свойствами нарушается равновесие между удерживающими и сдвигающими силами.

Участки, физико-механические параметры которых отличаются от фоновых, выступают как индикаторы местоположения элементов ослабления в карстовом массиве. Их выявление позволит оконтурить опасные зоны, в пределах которых в будущем при достижении полостным пространством критических поперечных размеров возможно образование карстового провала. ■

Литература / References

1. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск, 1992. [Dublyanskaya G.N., Dublyansky V.N. Mapping, zoning, and engineering and geological assessment of karst territories. Novosibirsk, 1992. (In Russ.).]
2. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Распространение карстующихся пород на территории России. Сергеевские чтения. М., 2001; 162–165. [Distribution of karst rocks in Russia. Sergeev's Readings. Moscow, 2001; 162–165. (In Russ.).]
3. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Распространение карстующихся пород и типов карста. Карстоведение — XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы междунар. симпозиума. Пермь, 2004; 49–53. [Distribution of karst rocks and types of karst. Karstology — XXI century: theoretical and practical significance: Proceedings of the International Symposium. Perm, 2004; 49–53. (In Russ., abstr. in Engl.).]
4. Катаев В.Н. Основы структурного карстоведения. Пермь, 2004. [Kataev V.N. Fundamentals of structural karstology. Perm, 2004. (In Russ.).]
5. Андрейчук В.Н. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы, 1999. [Andreichuk V.N. Sinkholes above the gypsum labyrinth caves and stability assessment of karst territories. Chernivtsi, 1999. (In Russ.).]
6. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н. Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории. Инженерная геология. 2010; 4: 34–46. [Erofeev E.A., Kataev V.N. Application of probabilistic and statistical methods for karst risk assessment under technogenic influence on the karst territories. Engineering Geology World. 2010; 4: 34–46. (In Russ.).]
7. Kaufmann O., Quinif Y. Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the "Tournaisis" area. Environmental Geology. 2002; 65: 117–124.
8. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М., 2017. [Anikeev A.V. Sinkholes and subsidence craters in the karst regions: development mechanisms, forecast, and risk assessment. Moscow, 2017. (In Russ.).]
9. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования. Промышленное и гражданское строительство. 2013; 11: 6–8. [Krashennikov V.S., Khomenko V.P. Covered Karst: Necessary Conditions, Reasons and Signs of Sinkhole Formation. Industrial and Civil Engineering. 2013; 11: 6–8. (In Russ., abstr. in Engl.).]
10. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М., 1986. [Tolmachev V.V., Troitskii G.M., Khomenko V.P. Engineering and construction development of karst territories. Moscow, 1986. (In Russ.).]
11. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности. Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума. Ред. В.Н.Катаев, Д.Р.Золотарев, С.В.Щербakov, А.В.Шилова. Пермь, 2015; 50–59. [Khomenko V.P. Collapse sinkholes formation: mechanisms and hazard assessment. Environmental safety and construction in karst areas: Proceedings of the International Symposium. V.N.Kataev, D.R.Zolotarev, S.V.Shcherbakov, A.V.Shilova (eds.). Perm, 2015; 183–187. (In Russ., abstr. in Engl.).]
12. Крашенинников В.С. Локальная оценка карстовой опасности с учетом особенностей строения покрывающей толщи. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2017. [Krashennikov V.S. Local assessment of karst hazard taking into account the structural features of the overburden. Extended abstract, PhD (Geology and Mineralogy) Dissertation. (In Russ.).]
13. Крашенинников В.С. Методика оценки карстоопасности в пределах локального участка изысканий. Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума. Ред. В.Н.Катаев, Д.Р.Золотарев, С.В.Щербakov, А.В.Шилова. Пермь, 2015; 183–187. [Krashennikov V.S. Methodology to evaluate of karst hazard within the local area of research. Environmental safety and construction in karst areas: Proceedings of the International Symposium. V.N.Kataev, D.R.Zolotarev, S.V.Shcherbakov, A.V.Shilova (eds.). Perm, 2015; 183–187. (In Russ., abstr. in Engl.).]
14. Дробинина Е.В., Ковалева Т.Г., Корякина А.В., Катаев В.Н. Анализ локальной изменчивости физико-механических свойств покровной толщи как метод оценки карстоопасности (на примере с.Усть-Кишерть). Вестник Пермского университета. Геология. 2017; 16(3): 242–255. [Drobinina E.V., Kovaleva T.G., Koryakina A.V., Kataev V.N. Analysis of the Local Variation of Physical and Mechanical Properties of the Covering Strata as a Method of Karst Hazard Assessment (an Example of the Ust-Kishert Village). Bulletin of Perm University. Geology. 2017; 16(3): 242–255. (In Russ., abstr. in Engl.).]
15. Щербakov С.В., Катаев В.Н. Механические свойства дисперсных грунтов покровной толщи и их роль в прогнозе карстовой опасности. Инженерная геология. 2016; 6: 4–17. [Shcherbakov S.V., Kataev V.N. Influence of the mechanical features of covering disperse soils on the prognosis of the karst hazard. Engineering Geology World. 2016; 6: 4–17. (In Russ., abstr. in Engl.).]
16. Катаев В.Н. Системный подход в анализе устойчивости карстовых массивов. Вестник Пермского университета. Геология. 1994; 3: 127–144. [Kataev V.N. A systematic approach to stability analysis of karst massifs. Bulletin of Perm University. Geology. 1994; 3: 127–144. (In Russ., abstr. in Engl.).]
17. Катаев В.Н. Основы структурно-тектонического анализа в карстоведении. Карстоведение — XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы международного симпозиума. Пермь, 2004; 63–69. [Kataev V.N. Principles of structural–tectonic analysis in karstology. Karstology — XXI century: theoretical and practical significance: Proceedings of the International Symposium. Perm, 2004; 63–69. (In Russ., abstr. in Engl.).]

18. Щербаков С.В., Катаев В.Н. Особенности геоморфологического строения карстовых массивов. Фундаментальные исследования. 2014; 12(4): 774–778. [Shcherbakov S.V., Kataev V.N. Features of geomorphological structure of karst massifs. Fundamental Research. 2014; 12(4): 774–778. (In Russ., abstr. in Engl.).]
19. Максимович Г.А. Основы карстологии. Т.1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь, 1963. [Maksimovich G.A. Fundamentals of Karstology. V.1: Issues on karst morphology, speleology, and karst hydrogeology. Perm, 1963. (In Russ.).]
20. Климчук А.Б. Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. Киев, 1989. [Klimchuk A.B. Role of the near-surface zone of karst massifs in hydrogeology and karst morphogenesis. Kiev, 1989. (In Russ.).]
21. Ford D. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester, 2007.
22. Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Терминология карста. М., 1991. [Timofeev D.A., Dublyansky V.N., Kiknadze T.Z. Karst terminology. Moscow, 1991. (In Russ.).]
23. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстология. Ч.1: Общее карстование: Учеб. пособие. Пермь, 2004. [Dublyansky V.N., Dublyanskaya G.N. Karstology. Part 1: General karstology: text book. Perm, 2004. (In Russ.).]
24. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н., Катаев В.Н. и др. Карстология. Ч.3: Инженерное карстование: Учеб. пособие. Пермь, 2011. [Dublyansky V.N., Dublyanskaya G.N. Kataev V.N. et al. Karstology. Part 3: Engineering karstology: textbook. Perm, 2011. (In Russ.).]
25. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М., 1995. [Savarenskii I.A., Mironov N.A. Engineering and geological survey guide for karst areas. Moscow, 1995. (In Russ.).]
26. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск, 1986. [Pecherkin A.I. Geodynamics of sulfate karst. Irkutsk, 1986. (In Russ.).]
27. Бондарик Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М., 1971. [Bondarik G.K. Fundamentals of the theory of variability of engineering and geological properties of rocks. Moscow, 1971. (In Russ.).]
28. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий. Инженерная геология. 1980; 3: 98–107. [Tolmachev V.V. A probabilistic approach in assessing the sustainability of karst territories and designing anti-karst strategy. Engineering geology. 1980; 3: 98–107. (In Russ.).]
29. Кутепов В.М. Оценка устойчивости закарстованных территорий методом анализа напряженного состояния массивов пород. Обзор и рекомендации. М., 1986. [Kutepov V.M. Analysis of the stress conditions of rocks for assessment the stability of karst territories. Overview and recommendations. Moscow, 1986. (In Russ.).]
30. Архидьяконовских Ю.В. Моделирование процессов суффозии и гидроразрыва гидросферы: Учебное пособие по спецкурсу. Пермь, 1983. [Arkhiidyakonovskikh Yu.V. Modeling of the processes of suffusion and hydraulic fracturing of the hydrosphere. Textbook for a special course. Perm, 1983. (In Russ.).]

Covering Karst Massifs: Study for the Purpose of Karstological Forecast

E.V.Drobinina^{1,2}, V.N.Kataev¹

¹Perm State University (Perm, Russia)

²Perm branch of LLC "Antikarst and coastal protection" (Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod oblast, Russia)

The conducted studies in theoretical terms are aimed at developing a systematic approach to the study of karst massifs — geological bodies of a specific structure (a set of elements and their interaction). The thickness of the covers over soluble rocks, as a structural element of the karst massif, responds to the occurrence and change of the parameters of the “weakening elements” in the karst stratum. Karst cavities, crushing and disintegration zones in soluble bedrock are considered as such weakening elements. It has been established that the properties of the overlying stratum are most clearly changing over the cavities that have reached critical transverse dimensions, at which the equilibrium between the holding and shear forces is violated and the cavity arch collapses. The areas of integument with anomalous values of physical and mechanical properties could serve as an indicator of the presence of karst cavities, the size of which does not reach a critical one. The mentioned properties are spatially correlated with areas of changes in the stress-strain state in the karst formation near the karst cavity and above it. A concrete example shows how the karst cavity (until it reaches a critical span) affects the properties of the integument.

Keywords: karst massif, covering layer, physical and mechanical properties, karstological forecast, covered karst, karst massif weakened elements, computer simulation.