

#### РАЗДЕЛ 4. ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК: 556.332.46

### ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

*Дробинина Е. В.<sup>1</sup>, Катаев В. Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1,2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия  
E-mail: <sup>1</sup>alenadrobina@yandex.ru*

*В статье рассматривается территория развития карбонатно-гипсового карста. Кратко описана концептуальная модель поведения дисперсных грунтов над элементами ослабления. Представлена методика оценки изменчивости физико-механических свойств перекрывающих суглинистых отложений в районе исследования. По результатам анализа разработана модель оценки карстовой опасности для изучаемой территории с последующей верификацией двумя способами.*

***Ключевые слова:** карстовая опасность, физико-механические свойства, перекрывающая толща, карстологический прогноз*

#### ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение растворимых горных пород, перекрытых толщей нерастворимых отложений, препятствующей непосредственному наблюдению за развитием карстового процесса, обуславливает необходимость изучения покровов, состояние и свойства которых определяют устойчивость массива над ослабленными зонами, возникающими в результате формирования карстовых полостей и зон повышенной трещиноватости. Недостаточное количество информации о карстопроявлениях по результатам изыскательских работ, зачастую отсутствие признаков поверхностной закарстованности определяют сложность прогнозирования процесса провалообразования, характеризующегося спонтанным характером.

В условиях покрытого и/или перекрытого карста [1] повышается вероятность возникновения внезапных обрушений, влекущих за собой социальный, экономический и экологический ущерб. В пределах Российской Федерации крупные провальные формы, связанные с развитием сульфатного (гипсового [2]), карбонатно-сульфатного (карбонатно-гипсового [2]) типов карста, встречаются на территории Центрально-Европейской части и в Приуралье.

Опасность присутствия элементов ослабления в карстовом массиве заключается, главным образом, в спонтанном обрушении грунтов в карстовую полость вследствие потенциального увеличения в процессе растворения морфометрических параметров существующих полостных форм и дизъюнктивов до критических размеров. Наиболее верный способ оценки подземной закарстованности массива — прямые наблюдения по результатам карстологического бурения, однако, зачастую экономически целесообразная густота

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

сети карстологических выработок недостаточна для достоверной оценки подземной закарстованности.

В условиях перекрытого карста весьма информативной с прогностической точки зрения является интегральная оценка карстовой опасности [3, 4,5, 6, 7], учитывающая не только характер поверхностной и подземной закарстованности территории, в том числе площадной, но и показатели природного строения, под которыми понимаются структурно-тектонические, геологические, гидрогеологические, геоморфологические и инженерно-геологические факторы развития карстового процесса [7]. В системе интегральной оценки карстоопасности, разработанной исследователями Пермского государственного национального исследовательского университета, роль перекрывающих отложений определяется главным образом через их мощности и литологию: детальными исследованиями состояния и прочностных свойств грунтов перекрывающей толщи не проводилось.

Данное исследование основано на представлении, что несмотря на внезапность процесса провалообразования, существование на глубине гидрогеологически активной (незаполненной) карстовой полости, или иной ослабленной зоны обуславливает неоднородность карстового массива. Неоднородность может проявляться на уровне всего массива или в пределах отдельного геологического слоя и выражается в невыдержанности свойств [8], причем, неоднородность массивов грунтов может быть обусловлена как структурными свойствами самого массива, так и внешними факторами; неоднородность одного элемента массива, может быть следствием происходящих изменений в другом элементе.

Карстовый массив является весьма динамичной геосистемой, что обуславливает пространственно-временную изменчивость ее структурных элементов. Формирование карстовых полостей в толще растворимых пород или на их контакте с нерастворимыми перекрывающими инициирует изменение состояния перекрывающих отложений, их прочностных свойств, и при достижении карстовой полостью критических размеров может привести к разрушению свода над ослабленной зоной.

### 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

В данной работе предлагается проследить изменчивость перекрывающих отложений над ослабленной зоной в Кишертском районе развития карбонатно-гипсового карста [2], приуроченного к зоне сочленения восточной окраины Восточно-Европейской платформы и прилегающих частей Предуральяского прогиба. В качестве исследуемого выбран участок, расположенный на II надпойменной террасе р. Сылвы в пределах территории с. Усть-Кишерт (рис. 1).

**Тектоническое строение.** Район исследований расположен на восточной окраине Восточно-Европейской платформы, в северной части Уфимского плато и Предуральяского прогиба в пределах Сылвинской впадины. Широкое распространение тектонических разломов, четко прослеживаемых на аэрофотоснимках и спутниковых снимках, свидетельствует о высокой тектонической активности района исследований. Согласно П. Милановичу [9]

карстовые воронки часто ориентированы в направлении наиболее протяженных разломов или зон разломов.

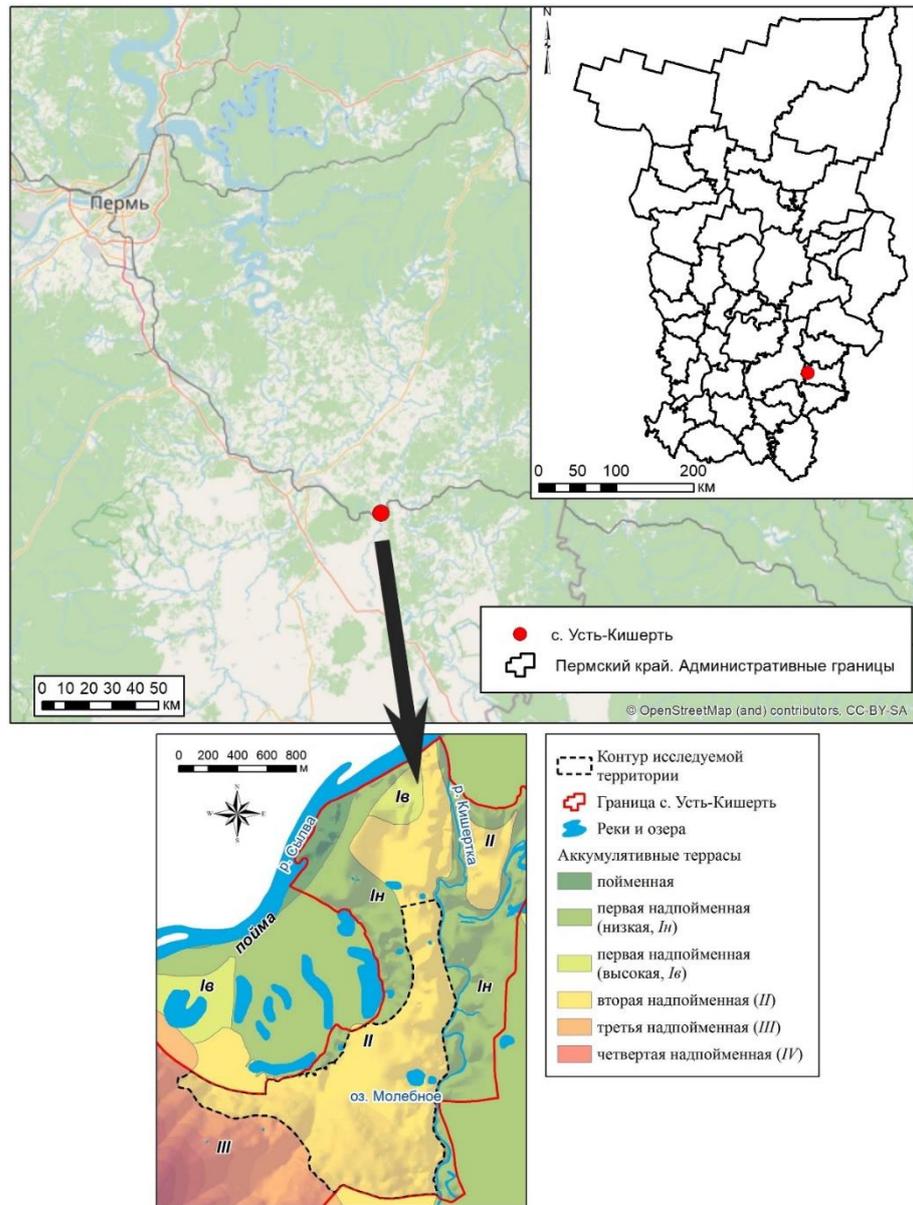


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории.

Составлено авторами.

**Геологическое строение.** В геологическом строении района исследований принимают участие известняки, доломиты, гипс и ангидрит, а также глины

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

(артинский и кунгурский ярусы пермской системы предуральского отдела). Карбонатные слои часто выклиниваются из геологического разреза, замещаясь сульфатами. В этих местах образуются большие карстовые полости, заполненные щебнем, глыбами и глиняным материалом. Сульфатный слой неравномерно раздроблен. В верхней части толщи и вблизи крупных карстовых полостей сульфатные породы сильно трещиноваты и выветрелы. Трещины разного направления заполнены белым гипсом, доломитом, реже глинистым материалом или волокнистым селенитом.

Над карстующимися отложениями залегает комплекс карстово-обвальных отложений, состоящий из обломков растворимых пород и вымытых между ними продуктов выветривания. Образование этого комплекса поэтапное, связано с неравномерным опусканием кровли карстующихся пород в результате выщелачивания, которое по мере увеличения пустотного пространства в карстующихся породах в конечном итоге приводит к обвалу вышележащей толщи. В толще карстово-обвальных отложений часто встречаются ослабленные зоны и полости, мощностью 1–4, иногда 10 м. О широком развитии полостного пространства в этих отложениях свидетельствует полная или частичная потеря промывочной жидкости при их проходке бурением [10].

Повсеместно коренные отложения перекрыты аллювиальными образованиями четвертичной системы, участками мощностью до 65,0 м. Отложения представлены суглинками, глинами, супесями, песками и гравийно-галечными почвами. Делювиальные и элювиальные отложения встречаются редко и представлены грунтами из песчаника или известняковых обломков и обломков с глинистым заполнителем (30%), залегают отдельными линзами под аллювиальными отложениями на глубине 2,5–13,5 м и имеют мощность 2,4–15,0 м.

**Гидрогеологические условия.** Грунтовые воды развиты в аллювиальных отложениях долины реки Сылвы: суглинках, супесях, гравийных и галечных грунтах. Глубина уровня грунтовых вод колеблется от 15 до 1 м, уменьшаясь по направлению к реке. Подземные воды пополняются за счет инфильтрации атмосферных вод, в районах, где отсутствует водонепроницаемый слой, возможен переток из карстового водоносного горизонта. Подземные воды преимущественно пресные (минерализация до 1 г/дм<sup>3</sup>).

Карстовый водоносный горизонт развит в карбонатных и сульфатных породах кунгурского яруса, где циркуляция воды связана с крупными трещинами и полостями, развитыми на контактах между сульфатными породами и известняками, аллювиальными отложениями, брекчированной коренной породой. Циркуляция сопровождается растворением коренных пород с образованием новых подземных карстовых форм. Глубина циркуляции определяется базисом эрозии.

Глубина карстового водоносного горизонта колеблется от 15 до 40 м. Преобладающая минерализация составляет около 2 г/дм<sup>3</sup>. Питание карстового водоносного горизонта происходит на Уфимском плато, где происходит поглощение атмосферных осадков и возможен их дренаж по зонам трещиноватости к растворимым коренным породам, циркуляция в которых уже обусловлена уклоном пластов. Кроме того, дополнительным источником питания карстового

водоносного горизонта может служить вода из озер, рек. Карстовые воронки также могут выполнять роль так называемых дренажных точек, по которым вода со взвешенными отложениями, включая загрязнители, переносится в водоносный горизонт с поверхности [11].

**Карстовые формы.** Типичные карстовые формы, развитые в районе исследования — карстовые воронки и карстовые полости. Встречается своеобразный тип форм, называемых зонами дробления, которые представляют собой ослабленные участки карстового массива, характеризующиеся высокой степенью фрагментации и трещиноватости. Следовательно, эти элементы обладают высокой гидрогеологической и гидрохимической активностью и включают зоны с высокой плотностью ориентированных трещин, зоны дробления, разломы и т. д. [12].

Элементы ослабления карстового массива на исследуемой территории представлены *карстовыми полостями* и *зонами дробления*. Карстовые полости и зоны дробления вскрыты скважинами в количестве 60 и 24 шт., соответственно. Карстовые полости зафиксированы при бурении скважин преимущественно в интервале глубин от 20 до 80 м. Зоны дробления встречаются на глубинах от 25 до 82 м. Вертикальная амплитуда полостей в скважинах изменяется от 0,2 до 9,0 м, в среднем составляя 2,0 м, вертикальная амплитуда зон дробления — 0,5–20,7 м, в среднем — 8,9 м.

## 2. СБОР И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛА

Необходимым условием проведения анализа состояния покровных отложений является сбор и систематизация большого количества материалов инженерно-геологических, карстологических и иных тематических изысканий. В программе MS Office Excel были созданы базы данных (БД), содержащие сведения о положении карстовых форм в растворимом пласте и физико-механические свойства перекрывающих отложений. Под базами данных авторами понимается упорядоченная совокупность данных, систематизированных подходящим для целей исследования образом. Программа MS Office Excel удобна для хранения и обработки большого количества числовых характеристик анализируемых факторов, для постоянного обращения к ним с возможностью проведения статистического и графического анализа.

Структура базы данных. БД представляет собой таблицу, содержащую 493 записи для с. Усть-Кишерть. Фильтрация значений производится стандартным фильтром MS Office Excel (автофильтр) по определенным критериям в одном или нескольких столбцах. База организована таким образом, что одномерный статистический анализ осуществляется непосредственно в ней по выборке, заданной автором. Имеется возможность получить кривую распределения (эмпирическую и теоретическую) и описательную статистику.

Кроме этого, структура базы удобна для экспорта табличных данных в разработанную форму для осуществления однофакторного дисперсионного анализа и для формирования точечных объектов (shapefile), содержащих атрибутивную

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

информацию о физико-механических свойствах, для дальнейшего пространственного анализа с формированием картографического материала.

### 3. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ НАД ЭЛЕМЕНТАМИ ОСЛАБЛЕНИЯ

При физическом моделировании процессов провалообразования было выявлено, что основную роль в подготовке деформаций обрушения играют растягивающие напряжения. Очевидно, что уменьшение напряжений в грунтах над сформированной карстовой полостью в массиве приводит к разуплотнению грунтов. Пески выносятся в поровое пространство, при отсутствии нисходящего потока только под действием силы тяжести. Для разуплотнения глинистых грунтов, частицы которых отличаются относительно сильными связями, требуется длительное время [13]. Принимая во внимание, парагенетическую связь перекрывающих глинистых отложений с элементами ослабления карстового массива, можно заключить, что с момента формирования порово-пустотного пространства вокруг него в карстовом массиве формируются области перераспределения напряжений.

Перераспределение напряжений в сфере влияния карстовой полости приводит к разуплотнению, изгибу покровной толщи, и, в конечном итоге, к последовательному обрушению сводов и истечению несвязных грунтов [13]. Таким образом, грунты, находящиеся в пределах области влияния карстовой полости или иной ослабленной зоны, должны отличаться пониженными величинами плотности и прочностных свойств.

Величина области влияния карстовой полости на перекрывающие породы определяется ее размерами. В результате моделирования процесса провалообразования на термопластических эквивалентных материалах было отмечено, что на ранних стадиях деформирования перекрывающей толщи над полостью критического размера область влияния последней примерно в три-пять раз превышает диаметр самой полости, незначительно возрастая в дальнейшем [13].

Для наглядного представления модели процесса методом компьютерного моделирования напряженного состояния грунтовой толщи ранее авторами продемонстрировано влияние элементов ослабления карстового массива на перекрывающие грунты [14]. Моделирование проводилось в программе Rocscience Phase<sup>2</sup> методом конечных элементов с использованием модели Мора–Кулона (Mohr–Coulomb).

Для примера был выбран карстовый массив в пределах II надпойменной террасы р. Сылвы, находящийся на территории с. Усть-Кишерть. Карстующиеся карбонатно-сульфатные породы перекрыты слоем тугопластичной глины четвертичного возраста, мощностью 7,6 м. В реальных условиях в кровле карстующихся пород элементов ослабления не было зафиксировано. Прочностные свойства глины характеризовались следующими параметрами: угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) —  $15^\circ$ , удельное сцепление ( $c$ ) — 33 кПа.

В условиях отсутствия карстовых полостей в основании перекрывающей толщи, эта толща находится в условно ненарушенном состоянии, при котором в

любой точке массива горизонтальные напряжения  $\sigma_1$  равны вертикальным  $\sigma_3$ . Если смоделировать наличие в кровле гипса незаполненной карстовой полости диаметром 3 м, вокруг полости сформируется зона перераспределения напряжений.

По двум парам значений напряжений ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ) в глине, в непосредственной близости к карстовой полости, построим круги Мора для определения предельного состояния глины в условиях развития в ее подошве карстовой полости. В таких условиях прочность глин составляет: угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) —  $21^\circ$ , удельное сцепление ( $c$ ) —  $10,2$  кПа. Вследствие разгрузки напряжений сила сцепления между частицами глинистых грунтов уменьшается (рис. 2).

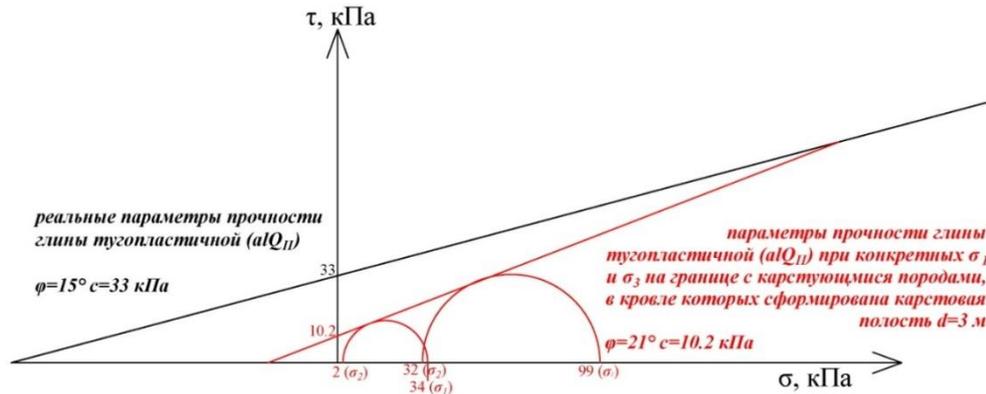


Рис. 2. Условие предельного равновесия в глине: при отсутствии карстовой полости (черная линия), при положении незаполненной карстовой полости на контакте карстующихся и карбонатных пород (красная линия).

Таким образом, наличие элементов ослабления в карстовом массиве выражается в разгрузке напряжений, что в свою очередь, при прочих равных условиях приводит к разуплотнению и разупрочнению глинистых грунтов.

#### 4. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Влияние элементов ослабления на свойства перекрывающих грунтов оценивалось путем определения степени и характера влияния на них фактора удаленности от элементов ослабления карстового массива. Следует уточнить, что на данном участке удаленность рассчитана как расстояние по вертикали от пробы до кровли неоген–четвертичного карстово-обвального комплекса отложений, по причине того, что последний представляет собой ослабленную зону. Разумеется, вследствие заполнения трещинно-полостного пространства дисперсным материалом влияние этой ослабленной зоны может быть относительно слабее, нежели влияние открытых трещин и карстовых полостей. Мощность карстово-обвальных отложений в пределах второй террасы изменяется от 10 до 40 м, при среднем значении 20–25 м.

Проанализированы свойства верхнечетвертичных суглинков преимущественно тугопластичных и полутвердых, тяжелых. В анализе использованы

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

нормализованные значения исследуемых параметров, диапазоны изменения реальных значений представлены в таблице 1. Для определения *степени влияния* фактора удаленности от элементов ослабления пород применен однофакторный дисперсионный анализ, подробное описание которого широко освещено в справочной литературе [15].

Таблица 1.

Диапазон изменения реальных значений физико-механических свойств суглинков (QIII) и удаленности от кровли карстово-обвальных отложений (N-Q)

Исследуемый параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Удельное сцепление, кПа	8	58
Коэффициент пористости, д. е.	0,620	1,540
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	1,54	2,03
Удаленность от кровли N-Q, м	0,5	40,0

*Характер изменения* физико-механических свойств по мере удаления от элементов ослабления по вертикали оценивался путем прямого сопоставления посредством построения двумерных облаков точек, характеризующих зависимость исследуемого свойств от удаленности от элементов ослабления. Очевидно, что диаграммы, приведенные на рисунке 3А, не являются информативными, так как в большинстве случаев по ним невозможно установить даже приблизительный характер связи. Извлечь информацию о характере зависимости позволяет операция осреднения значений исследуемых свойств в равных интервалах значений удаленности от элемента ослабления (рисунок 3Б). Данная процедура позволяет оценить направленность наблюдаемой зависимости (тренд), а в некоторых случаях, и установить ее характер (линейная, экспоненциальная, логнормальная и др.).

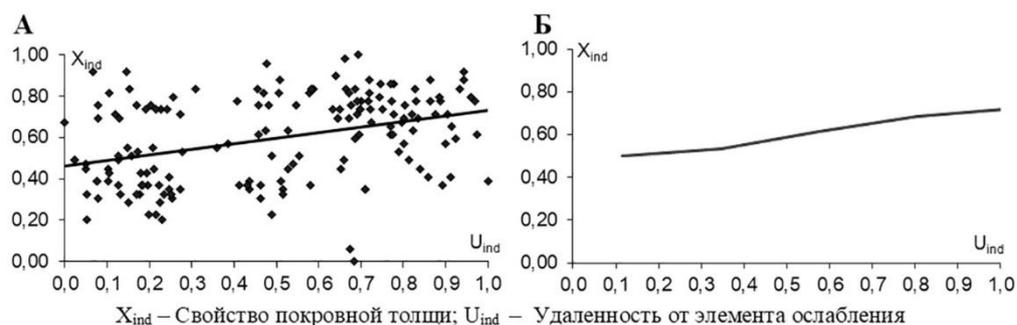


Рис. 3. Определение характера зависимости значений свойств от удаленности от элементов ослабления.

Так, для участка II надпойменной террасы в пределах территории с. Усть-Кишерть определено существенное влияние элементов ослабления карстового массива на свойства перекрывающих верхнечетвертичных суглинков, проявляющееся в закономерном увеличении по мере удаления от кровли карстово-обвальных отложений плотности суглинков (при закономерном понижении значений коэффициента пористости) и их удельного сцепления.

Полученные зависимости и результирующие величины дисперсионного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2.  
Формулы аппроксимации зависимостей средних значений исследуемых параметров от удаленности от кровли карстово-обвальных отложений

Исследуемый параметр	Вид аппроксимирующей кривой	Формула	Величина достоверности аппроксимации
Удельное сцепление	экспоненциальная	$y = 0,178e^{0,892x}$	0,8
Коэффициент пористости	экспоненциальная	$y = 0,284e^{-0,301x}$	0,8
Плотность грунта	экспоненциальная	$y = 0,452e^{0,549x}$	0,9

Методика создания интегральной модели карстоопасности сводится к построению картографических моделей изменения исследуемых свойств, переводению их в балльную форму по принципу увеличения балла опасности по мере снижения плотности и прочностных свойств грунтов и последующему совмещению и суммированию балльных оценок.

По точечным данным расположения проб методом интерполяции строятся растровые модели по всем перечисленным физико-механическим показателям. Интерполяция проводится по пробам, приуроченным к подошве исследуемых слоев покровных отложений, так как именно в этой части слоя влияние элементов ослабления прослеживается особенно явно.

Затем производится классификация растровых моделей. В качестве метода классификации значений частных растров в рамках данного исследования выбран метод геометрических интервалов (Geometrical Interval), позволяющий добиться того, что в каждом классе будет находиться примерно равное количество значений, и размеры интервалов будут примерно равнозначными.

Классифицированные модели методом переклассификации, заключающемся в изменении диапазонов реальных значений баллами опасности, превращаются в балльные. Баллы назначаются выделенным интервалам на основании проведенных ранее исследований, результаты которых свидетельствуют о снижении плотности и прочности грунтов над элементами ослабления. Иными словами, максимальный

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ

балл назначается интервалам минимальных значений плотности и удельного сцепления, и максимальных значений коэффициента пористости.

Затем балльные модели накладываются друг на друга с целью суммирования баллов карстовой опасности. В результате исследуемая территория ранжируется на классы различной карстовой опасности: от пониженной до повышенной. Ранжирование по карстовой опасности произведено таким образом, что к пониженной опасности относится территория, где суммарный балл опасности составляет менее пяти, к повышенной — более десяти, территория с промежуточными значениями интегрального показателя разбита на две категории.

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследуемой территории получена интегральная карта карстовой опасности, построенная на основании изменчивости свойств исследуемых грунтов в подошве слоя покровных отложений (рис. 4).

Верификация исследования, или проверка объективности построенной модели карстоопасности, проводится посредством анализа местоположения карстопоявлений, зафиксированных на данной территории, и их пространственного сопоставления с категориями карстовой опасности. Результат пространственного анализа представляется в табличном и графическом виде с указанием количества карстовых форм, пространственно соотнесенных с категориями на интегральной модели. Максимальное количество форм отмечено в пределах повышенной категории карстовой опасности, в то время как пониженная категория отличается отсутствием подземных форм и минимальным количеством поверхностных.

Второй способ верификации полученной модели заключался в визуальном сопоставлении с моделью карстоопасности, разработанной Т. Г. Ковалёвой ([5], рис. 4). Сравнимые модели характеризуются значительным сходством: большая часть исследуемой территории описывается категориями повышенной опасности и опасной (модель 2; 8–10 и 11–15 баллов, соответственно) и I и II (модель 1; наименование согласно СП 11-105-97 ч.II), которые преимущественно совпадают территориально, за исключением нескольких участков. Так, на модели 2 южная часть исследуемой территории отличается пониженной и средней категориями карстоопасности (< 5 и 5–7 баллов, соответственно), в то время как на модели 1 на юге — III и II категории (наименование согласно СП 11-105-97 ч.II). Также на модели 2 отмечается участок с повышенной категорией карстовой опасности (11–15 баллов) на юго-востоке исследуемой территории, где на модели 1 — II категория.

Визуальное сходство подтверждается результатом проведенного анализа сходимости разработанной автором модели 2 с моделью 1 Т. Г. Ковалевой, заключающегося в пространственном соотношении моделей посредством их пересечения. Процентное соотношение сходимости рассчитано как отношение площади, занимаемой категорией (модель 2) в пределах категории схожей степени опасности (модель 1), к общей площади, занимаемой этой категорией (модель 2; таблица 3).

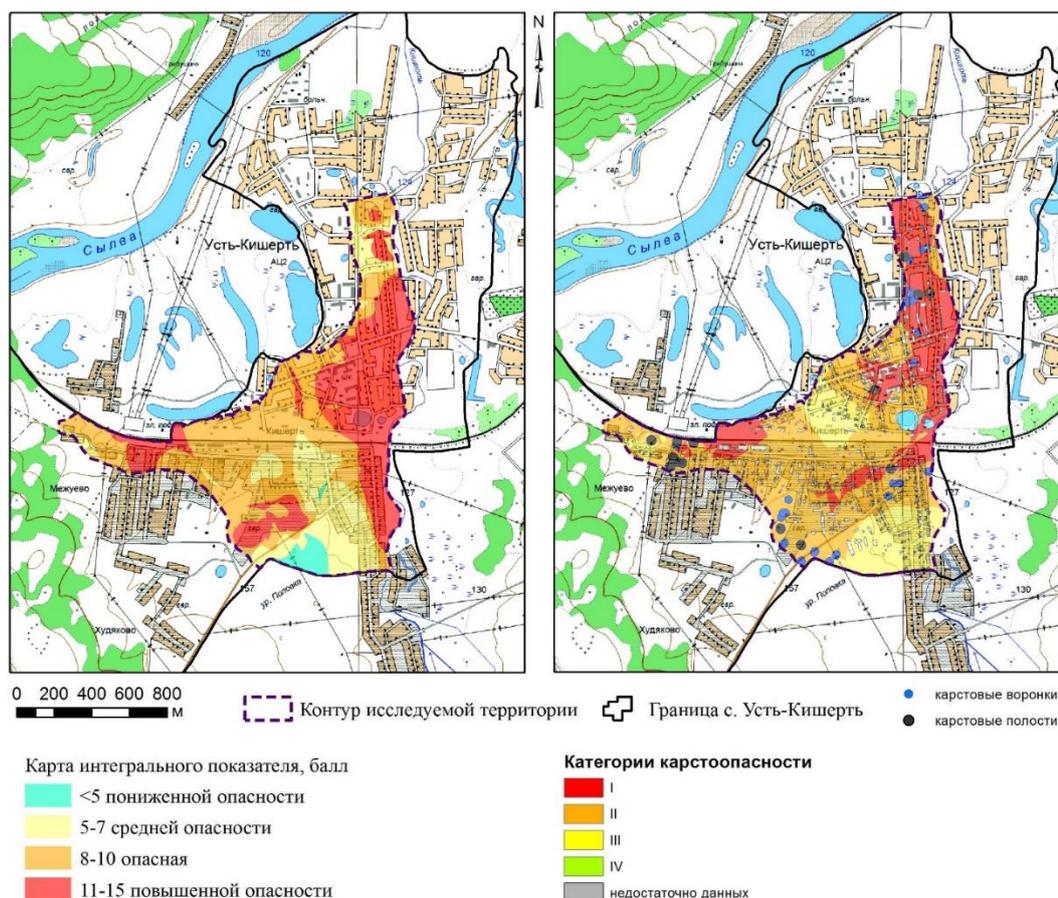


Рис. 4. Визуальное сопоставление сравниваемых моделей: слева — интегральная картографическая модель карстовой опасности исследуемой территории в пределах II надпойменной террасы р. Сылвы, справа — фрагмент модели карстоопасности, разработанной Т. Г. Ковалёвой [5].

Составлено авторами.

Из таблицы 3 видно, что сходимость моделей на территории повышенной опасности и опасной (модель 2) со I и II категориями на модели 1 составляет 55% и 67%, соответственно, при этом в пределах категории повышенной опасности (модель 2) находится 39% площади отведенной на модели 1 под II категорию и 6% — под III, в пределах опасной категории на модели 1: 17% занято категорией III, 16% — категорией I. Категория средней опасности (модель 2) характеризуется относительно высоким процентным соотношением сходимости с II и III категориями на модели 1 (46% и 35%, соответственно), категория пониженной опасности (модель 2) — высоким процентным соотношением сходимости с III категорией на модели 1, составляющей 74%. IV категория (модель 1) находится за пределами исследуемой автором территории.

**ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСТОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ**

Таблица 3.

Матрица процентного соотношения сходимости предлагаемой модели (модель 2)  
с моделью 1 Т. Г. Ковалевой [5]

Модель 1		Модель 2				Сумма
Интегральный показатель, балл	Категория карстовой опасности	Категория карстоопасности на модели Т. Г. Ковалевой (согласно СП 11-105-97 ч. II)				
		I	II	III	IV	
< 5	пониженной опасности	0%	26%	74%	–	100%
5–7	средней опасности	19%	46%	35%	–	100%
8–10	опасная	16%	67%	17%	–	100%
11–15	повышенной опасности	55%	39%	6%	–	100%

**ВЫВОДЫ**

Таким образом, тезис о возможности применения детального анализа физико-механических свойств на локальном прогнозном уровне в рамках интегрального карстологического прогноза подтверждается в результате проведенного картографического моделирования с последующей верификацией модели с использованием данных о подземной и поверхностной закарстованности. Использование методики исследования свойств грунтов перекрывающей толщи с применением вероятностно-статистического аппарата позволяет выявлять карстоопасные участки над элементами ослабления карстового массива, чем повышает эффективность интегрального карстологического прогноза. Кроме того, данная методика является открытой, при достаточном обосновании возможно включение в анализ других физико-механических свойств.

**Список литературы**

1. Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н. Карстоведение. Ч. 1. Общее карстоведение. Пермь, 2004. 308 с.
2. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1992. 200 с.
3. Золотарев Д. Р., В. Н. Катаев. Воздействие линеаментной тектоники на развитие карстовых процессов на локальном уровне // ГЕОРИСК, № 1, 2013. С. 34-43.
4. Катаев В. Н., Кадебская О. И. Геология и карст города Кунгура. Пермь: Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН, 2010. 236 с.
5. Ковалёва Т. Г. Методические основы оценки карстоопасности на ранних стадиях прогноза устойчивости территорий (на примере карбонатно-сульфатного карста Предуралья). Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. Екатеринбург, 2015. 21 с.

6. Ковалева Т. Г. Результаты оценки карстоопасности территорий развития карбонатно-сульфатного карста на основе геолого-гидрогеологических факторов // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. С. 173-176.
7. Щербаков С. В., Катаев В. Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. Том 153, кн. 1. 2011. С. 203-224.
8. Роза С. А. Механика грунтов. М., 1962. 229 с.
9. Milanović Petar. Karst Hydrogeology. Belgrade, 2018. 390 p.
10. Печеркин А. И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск, 1986. 172 с.
11. Zhou W, Beck V. F. Engineering issues on karst. In: P. van Beynen (Ed), Karst Management. Springer, Dordrecht, 2011, pp. 9–45. DOI 10.1007/978-94-007-1207-2\_2.
12. Катаев В. Н. Системный подход в анализе устойчивости карстовых массивов // Вестник Пермского университета. Вып. 3. Геология. 1994. С. 127–144.
13. Аникеев А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва: РУДН, 2017. 328 с.
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. № 3. 2017. С. 242-255.
15. Родионов Д. А., Коган Р. И., Голубева В. А. и др. Справочник по математическим методам в геологии. М.: Недра, 1987. 335 с.

## **STUDY OF VARIABILITY OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF OVERLYING SOILS IN KARSTOLOGICAL FORECAST**

*Drobinina E. V.<sup>1</sup>, Kataev V. N.<sup>2</sup>*

*<sup>1,2</sup>Perm State University, Perm, Russian Federation  
E-mail: <sup>1</sup>alendrobinina@yandex.ru*

The integral karst susceptibility assessment is very informative for areas where soluble rocks are overlaid by insoluble ones. It takes into account not only the surface and subsurface karst forms distribution, but the data of geological structure style of karst massive such as tectonic, geological, hydrogeological, geomorphological factors that control the karst process development.

The research region is situated in the southeast of the Perm region (Russia) in predominantly gypsum and carbonate-gypsum karst area of the Kishert district. The study area is located within the territory of Ust-Kishert village on the second accumulative terrace of Sylva river. Karst forms are spread in the research area.

The influence of the zone of weakness in karst massive on the geotechnical properties of the overlying soils is studied by determining the degree and nature of this influence, which characterized by the distance from the zone of weakness. The distance is calculated as the vertical interval from the research soil sample to the top of the Neogene-Quaternary karst-collapsed debris zone, marked early as the zone of weakness in karst massive. The statistical data analysis is applied in the research.

The zones of weakness in karst massive are areas where massive structure is disturbed by solution or fissure tectonics or gravity collapse. In the research Neogene-Quaternary karst-collapsed debris zone takes on the role of the zone of weakness in karst massive. This

zone consists of karst-collapsed debris and fine-grained products of weathering between them. Obviously, due to the filling of the fissure-cavity space with fine-grained material, the influence of this zone of weakness can be relatively weaker than the influence of open cracks, fissures and karst cavities.

A significant influence of the Neogene-Quaternary karst-collapsed debris zone on the geotechnical properties of Upper quaternary loams was determined. This study has found that generally density of loam and their cohesion increase as the distance from the zone of weakness increases, too. Conversely, the values of the porosity coefficient decrease. The results of this investigation was applied for making of integrated susceptibility map. Verification of the integral karst susceptibility map is carried out by analyzing of a space relapse of the karst forms location due to different categories of karst susceptibility.

The karst susceptibility model that is made using analysis of common geological structure parameters [5–6] was complemented by the model that based on a complex assessment of the overlying soil geotechnical properties. These models have good convergence of results and complement each other.

The results of this investigation show the effectiveness of the research of the karst massive geological structure style in order to the karst susceptibility assessment. The karst susceptibility model can be used to identify karst dangerous areas above the zone of weakness in the karst massive.

**Keywords:** karst hazard, geotechnical properties, overlying soils, karstological forecast.

#### References

1. Dublyanskij V. N., Dublyanskaya G. N. Karstovedenie. CH. 1. Obshchee karstovedenie. Perm', 2004. 308 p. (in Russian).
2. Gorbunova K. A., Andrejchuk V. N., Kostarev V. P., Maksimovich N.G. Karst i peshchery Permskoj oblasti. Perm': Perm. gos. un-t, 1992. 200 p. (in Russian).
3. Zolotarev D. R., V. N. Kataev. Vozdejstvie lineamentnoj tektoniki na razvitie karstovyh processov na lokal'nom urovne. GEORISK, no. 1, 2013. pp. 34-43. (in Russian).
4. Kataev V. N., Kadebskaya O. I. Geologiya i karst goroda Kungura. Perm': Perm. gos. un-t; GI UrO RAN, 2010. 236 p. (in Russian).
5. Kovalyova T. G. Metodicheskie osnovy ocenki karstoopasnosti na rannih stadiyah prognoza ustojchivosti territorij (na primere karbonatno-sul'fatnogo karsta Predural'ya). Avtoref. dis. kand. geol.-miner. nauk. Ekaterinburg, 2015. 21 p. (in Russian).
6. Kovaleva T. G. Rezul'taty ocenki karstoopasnosti territorij razvitiya karbonatno-sul'fatnogo karsta na osnove geologo-gidrogeologicheskikh faktorov. Ekologicheskaya bezopasnost' i stroitel'stvo v karstovyh rajonah: materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma. (eds.) V. N. Kataeva, D. R. Zolotareva, S. V. SHCHerbakova, A. V. SHilovoj; Perm. gos. nac. issled. un-t. Perm', 2015. pp. 173-176. (in Russian).
7. SHCHerbakov S. V., Kataev V. N. Integral'naya ocenka karstoopasnosti urbanizirovannyh territorij (na primere g. Kungur). Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki. Vol. 153, kn. 1. 2011. pp. 203-224. (in Russian).
8. Roza S. A. Mekhanika gruntov. M., 1962. 229 p. (in Russian).
9. Milanović Petar. Karst Hydrogeology. Belgrade, 2018. 390 p.
10. Pecherkin A. I. Geodinamika sul'fatnogo karsta. Irkutsk, 1986. 172 p. (in Russian).
11. Zhou W, Beck B. F. Engineering issues on karst. In: P. van Beynen (Ed), Karst Management. Springer, Dordrecht, 2011, pp. 9–45. DOI 10.1007/978-94-007-1207-2\_2.
12. Kataev V. N. Sistemnyj podhod v analize ustojchivosti karstovyh massivov. Vestnik Permskogo universiteta. Ussue. 3. Geologiya. 1994. pp. 127–144. (in Russian).

13. Anikeev A. V. Provaly i voronki osedaniya v karstovyh rajonah: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i ocenka riska. Moskva: RUDN, 2017. 328 p. (in Russian).
14. Drobina E. V., Kovaleva T. G., Koryakina A. V., Kataev V. N. Analiz lokal'noj izmenchivosti fiziko-mekhanicheskikh svojstv pokrovnoj tolshchi kak metod ocenki karstoopasnosti (na primere s. Ust'-Kishert'). Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. no. 3. 2017. pp. 242–255. (in Russian).
15. Rodionov D. A., Kogan R. I., Golubeva V. A. i dr. Spravochnik po matematicheskim metodam v geologii .M.: Nedra, 1987. 335 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 30.05.2021*