

Устойчивость перекрывающей дисперсной толщи в анализе морфометрии подземных карстовых форм

Е.В. Дробинина, Д.Р. Золотарев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, email: alenadrobina@yandex.ru, denisзолотарев@bk.ru

АННОТАЦИЯ: Формирование провальных карстовых форм в условиях покрытого карста зависит от устойчивости дисперсных отложений, перекрывающих массив карстующихся пород. Устойчивость перекрывающей толщи обусловлена прочностными характеристиками слагающих ее грунтов. В данной работе исследован предельно допустимый радиус подземных карстовых форм, при котором обрушения покровной дисперсной толщи в карстовую полость не происходит. Изменение предельно допустимого радиуса подземных карстовых форм описано посредством картографической модели. Данная модель отвечает предельно устойчивому состоянию перекрывающей толщи. В результате корреляционного анализа выявлена прямая связь предельно допустимого радиуса карстовой полости с мощностью перекрывающих отложений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *карстовая воронка, карстовая полость, предельный радиус полости, мощность перекрывающей толщи.*

1 ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое состояние покровной дисперсной толщи в районах покрытого карста обуславливает безопасность инженерной деятельности человека. Устойчивость толщи зависит не только от размера полости, сформированной в карстующихся отложениях посредством карстового процесса, но и от прочностных характеристик перекрывающей толщи. При прочих равных условиях над полостью одного диаметра устойчивость перекрывающей толщи будет различна в соответствии с мощностью отложений и их сопротивлением сдвигу.

В данной работе исследовался район с. Усть-Кишерть Пермского края, характеризующийся широким развитием карстовых форм как поверхностных, так и подземных.

2 УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Исследуемая территория относится к Кишертскому району преимущественно сульфатного и карбонатно-сульфатного карста. Для района характерно преобладание покрытого (подаллювиального) карста, выраженного крупными прова-

лами, воронками, котловинами, депрессиями и др. (Катаев, 2001).

Покровные отложения отличаются неконсолидированностью (Печеркин, Болотов, 1983), прочность дисперсных отложений обуславливается силами, действующими между частицами грунтов. Толща перекрывающих отложений в районе исследования сложена преимущественно глинистыми грунтами (суглинки, глины), прочность которых зависит от сил внутреннего трения и сцепления между отдельными частицами грунта, выраженных через угол внутреннего трения и показатель удельного сцепления, соответственно.

Для территорий покрытого карста характерно образование провальных форм вследствие обрушения некарстующихся рыхлых пород в полость, сформированную в кровле карстующихся отложений.

В случае возникновения ослабленной зоны в кровле карстующихся пород толща перекрывающих нерастворимых дисперсных отложений, будет находиться в предельно устойчивом состоянии до тех пор, пока сдвигающее напряжение не превысит сопротивление сдвигу. Следовательно, устойчивое состояние массивов пород над ослабленными зонами будет обеспечено, ес-

ли сдерживающие силы равны или больше сдвигающих сил (Кутепов, 1986):

$$N \geq F, \quad (1)$$

где N – удерживающие силы, F – сдвигающие силы.

А.В. Аникеев (2004) отмечает, что существующие методы расчета устойчивости грунтовой толщи основаны на схеме смещения «столба» грунта по цилиндрической поверхности над ослабленным участком растворимых пород. Сдвигающая сила, вызывающая перемещение пород в карстовую полость, равна весу пород в объеме цилиндра над ослабленной зоной в массиве карстующихся отложений (Кутепов, 1986; Аникеев, 2004):

$$F = \gamma h \pi R_{\text{пол}}^2, \quad (2)$$

где γ – удельный вес пород, т/м³, h – мощность слоя, м, $R_{\text{пол}}$ – радиус полости, м.

Сдвигающей силе противостоит сдерживающая сила как результат действия горизонтального давления на боковую поверхность цилиндра пород над ослабленной зоной. Для связных грунтов сдерживающая сила равна (Кутепов, 1986; Аникеев, 2004):

$$N = \pi h (\gamma h \tan \varphi \tan^2 (\pi/4 - \varphi/2) + 2c), \quad (3)$$

где φ – угол внутреннего трения, рад., c – удельное сцепление, т/м².

Предельно устойчивое состояние перекрывающей толщи над ослабленными полостями отвечает ситуации, при которой сдерживающие и сдвигающие силы равны (Кутепов, 1986):

$$K = \frac{N}{F} = 1, \quad (4)$$

где K – коэффициент устойчивости.

3 МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАДИУСОВ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ

Морфометрия карстовых полостей в рамках данной работы исследовалась с использованием имеющихся данных лабораторного исследования прочностных характеристик проб грунтов, полученных в процессе инженерно-геологических изысканий, проведенных в разное время на исследуемой территории. Для каждой скважины были посчитаны средние значения удельного веса γ грунта, показателей сопротивления сдвигу (c и φ) для перекрывающей дисперсной толщи, которая в рамках данного исследования в районе схематизирована и представлена в виде однослойной глинистой толщи, к которой применима расчетная модель В.М. Кутепова (1986). С ис-

пользованием перечисленных параметров для каждой скважины посчитаны сдвигающая и сдерживающая силы. Радиус карстовой полости $R_{\text{пол}}$ в расчетах принят равным r . Таким образом, подставляя все имеющиеся данные в уравнения (2) и (3) получаем:

$$F = Br^2, \quad (5)$$

$$N = Ar, \quad (6)$$

где $B = \gamma h \pi$ – некоторое действительное число, получающееся при подстановке данных в формулу (2); $A = \pi h (\gamma h \tan \varphi \tan^2 (\pi/4 - \varphi/2) + 2c)$ – некоторое действительное число, получающееся при подстановке данных в формулу (3).

Ранее отмечено, что предельно устойчивое состояние покровной толщи обеспечивается равенством сдерживающей и сдвигающей сил. Тогда, предельный радиус можно рассчитать по формуле (7):

$$R_{\text{lim}} = \frac{A}{B} \quad (7)$$

Формулы расчета критического радиуса карстовой полости приводятся в работах В.М. Кутепова (1986), А.В. Аникеева (2004). В рамках данного исследования для целей построения картографической модели изменения предельно допустимого радиуса предпочтительнее формула (7).

Картографическое моделирование проводилось в программном продукте ArcGIS 10.3. По точечным значениям данных показателей A и B построены растровые модели. В результате проведенного пространственного анализа путем деления растровой модели, описывающей изменение по площади показателя A , на растровую модель показателя B получен результирующий растр, непрерывно описывающий изменения величины предельно допустимого радиуса карстовой полости на исследуемом участке.

Предельно допустимый радиус карстовой полости зависит от параметров, характеризующих состояние и сопротивление сдвигу толщи перекрывающих пород, и от их мощности. С целью исследования морфометрии подземных карстовых полостей проанализирована связь морфометрии полости в плане и мощности перекрывающих отложений. Вся исследуемая территория разбивалась на квадраты 50×50 м, в которых на основании растровых моделей были посчитаны средние значения предельно допустимого радиуса карстовой полости и мощности перекрывающих отложений. Массивы значений исследуемых величин участвовали в корреляционном анализе.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследования морфометрии карстовых полостей, образующихся в кровле карстующихся пород, была получена картографическая модель изменения величины R_{lim} (рисунок 1). На данной модели выделяются участки с различным значением предельно допустимого радиуса карстовой полости, при превышении которого толща перекрывающих пород над ослабленной зоной потеряет устойчивость, и произойдет формирование провальной формы. При прочих равных условиях, на участках с меньшим значением предельного радиуса формирование провальных форм более вероятно, чем на участках с большим значением.

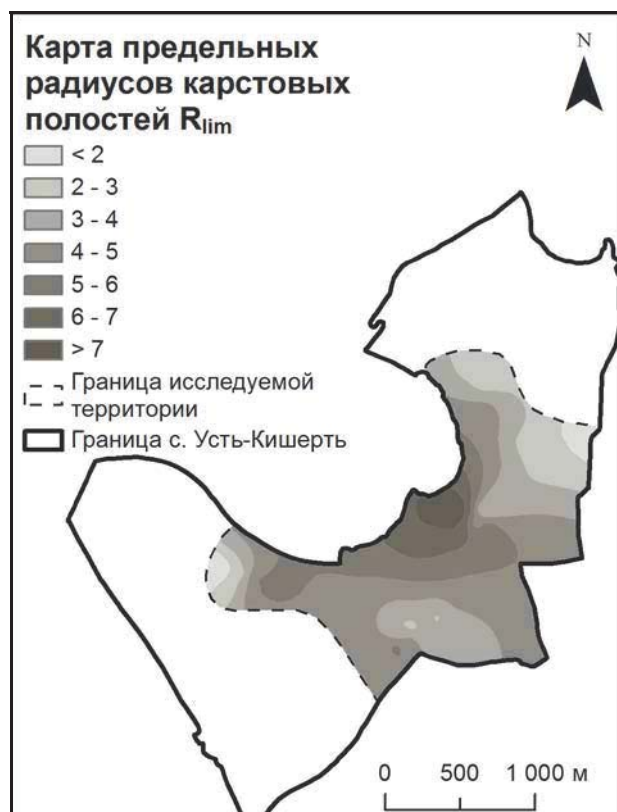


Рисунок 1. Карта предельных радиусов карстовых полостей.

Корреляционный анализ полученных средних значений предельно допустимого радиуса карстовой полости и мощности перекрывающих пород выявил наличие прямой связи между исследуемыми величинами, с коэффициентом корреляции R равным 0.82. На рисунке 2 приведена диаграмма рассеяния, где в качестве независимого параметра выступает мощность перекрывающих отложений, в качестве зависимого – предельный радиус карстовой полости. На графике присутствует линейное уравнение регрессии, характеризующие зависимость предельно допустимого радиуса карстовой полости от мощности перекрывающих отложений с определенной степенью достоверности аппроксимации R^2 .

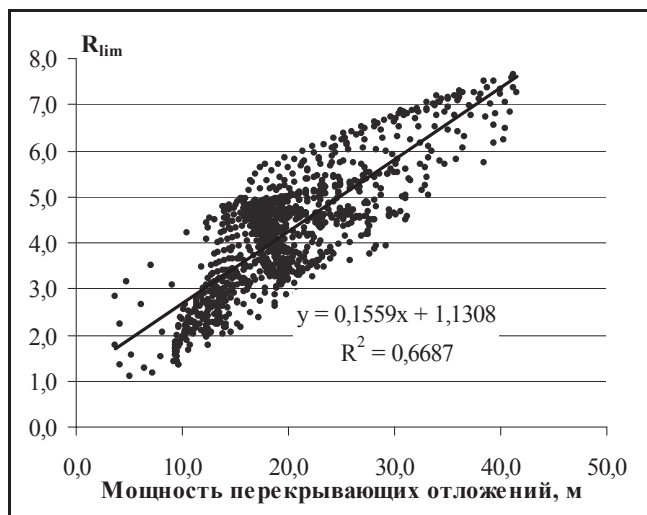


Рисунок 2. Точечный график зависимости предельно допустимого радиуса карстовой полости R_{lim} от мощности перекрывающих отложений.

5 ВЫВОДЫ

Таким образом, в данном исследовании построена картографическая модель предельных радиусов карстовых полостей для участка развития покрытого карста на территории с. Усть-Кишерть Пермского края.

Данная модель позволяет проследить пространственное изменение предельно допустимого радиуса подземных карстовых форм для территории, характеризующейся предельно устойчивым состоянием перекрывающей дисперсной толщи.

В результате корреляционного анализа выявлена прямая связь между предельно допустимым радиусом карстовых полостей и мощностью перекрывающей толщи, получено линейное уравнение регрессии определенной степени достоверности аппроксимации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аникеев А.В. Провалы в районах покрытого карста как результат массовой суффозии песков и разрушения глин // *Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы международного симпозиума (25-30 мая 2004, Пермь, Россия)*. Пермь: Пермский ун-т. 2004. С. 216-220.
- Катаев В.Н. *Методология и практика сравнительно-оценочного карстологического районирования*. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2001. 85 с.
- Кутепов В.М. *Оценка устойчивости закарстованных территорий методом анализа напряженного состояния массивов пород. Обзор и рекомендации*. М.: ЦП НТГО, 1986. 69 с.
- Печеркин А.И. Болотов Г.Б. *Геодинамика рельефа карстующихся массивов*. Учебное пособие по спецкурсу. Пермь: Пермский ун-т, 1983. 84 с.

The stability of the disperse overburden in the morphometry analysis of underground karst forms

E.V. Drobinina & D.R. Zolotarev

Perm State University, Perm, Russia, email: alenadrobinina@yandex.ru, deniszolotarev@bk.ru

ABSTRACT: Sinkholes formation depends on the stability of disperse soils that overburden karst rocks at the covered karst areas. The stability of the disperse overburden is due to mechanical strength characteristics of soil composing the overburden. The limiting cavity radius, at which there is no overhead caving into the karst cavity, is investigated. Cartographic model describing alterations of the limiting cavity radius at study area has been built. The model refers to limit steady state of overburden. The linear relationship between limiting cavity radius and overburden thickness has been established with the help of correlation analysis using regression methods.

KEYWORDS: *sinkhole, karst cavity, limiting cavity radius, overburden thickness.*