

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-50-57>

УДК 551.435.832

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ СВОЙСТВ РАСТВОРИМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВБЛИЗИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ В ОБСТАНОВКАХ РАЗВИТИЯ
КАРБОНАТНО-СУЛЬФАТНОГО КАРСТА
VARIABILITY OF THE SOLUBLE ROCKS PROPERTIES NEAR SURFACE
KARST FORMS IN THE AREA OF CARBONATE-SULPHATE KARST
DEVELOPMENT**

**Е. В. Дробинина
E. V. Drobinina**

*Научно-исследовательская лаборатория инженерно-экологических исследований геологического
факультета ПГНИУ, ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, Россия
Perm State University, laboratory of engineering and environmental research of the faculty of geology,
Bukireva st., 15, Perm, 614990, Russia*

alenadrobinina@yandex.ru

Аннотация: Статья посвящена изучению свойств растворимых пород на закарстованной территории в пределах Добрянского района Пермского края. Участок расположен в районе развития карбонатно-сульфатного карста с широким распространением поверхностных карстовых форм. Проведена оценка изменения содержания карбонатов, гипсов и ангидритов в толще скальных грунтов по мере удаления от поверхностных карстовых форм. Также проанализировано изменение коэффициента размягчаемости карбонатов — величины, характеризующей способность грунтов снижать свою прочность после водонасыщения. Определена тенденция в изменении исследуемых параметров в зависимости от удаленности от карстовых форм и сделан вывод о наличии нелинейной функциональной зависимости между исследуемыми параметрами. Предпринята попытка аппроксимировать полученные зависимости с целью получить прогнозные уравнения. С использованием полученных уравнений на растровых моделях, построенных по частным значениям изучаемых параметров, выделены потенциально опасные в карстовом отношении интервалы, которые рекомендуется также оконтурить при зонировании территории, как участки неблагоприятные, а в некоторых случаях и опасные, в отношении карста.

Annotation: The properties of soluble rocks in the karst area within the Dobryanskiy district of Perm Krai are studied. The research area is located in the region of carbonate-sulfate karst development with a wide distribution of surface karst forms. The change in the content of carbonates, gypsum and anhydrite in the soluble rocks depending on the distance from the surface karst forms is evaluated. The change in the carbonate softening coefficient, that is characterized the ability of soils to reduce their strength after water saturation, is analyzed, as well. The tendency of the research parameters changes depending on the distance from the surface karst forms was determined and the conclusion about the presence of non-linear functional dependence between the research parameters was made. The dependences were approximated to get predictive equations. With the use of the equations on the raster models, that were built by interpolation of the special values of the studied parameters, the potentially karst susceptibility intervals are selected. These zones are also recommended to outline during the territory zonation as areas unfavorable with respect to the karst.

Ключевые слова: карстовый массив; содержание карбонатов и сульфатов в грунтах; размягчаемость карбонатов; карстовые воронки; карбонатно-сульфатный карст; оценка карстовой опасности

Keywords: karst massif; the content of carbonates and sulfates in soils; softening of carbonates; surface karst forms; carbonate-sulfate karst; karst susceptibility assessment

Введение

Освоение территорий, в геологическом строении которых принимают участие карбонатно-сульфатные породы, сопряжено с высокими рисками различного плана, избежать которые возможно только посредством проведения адекватной оценки карстовой опасности. Такая оценка должна включать не только анализ пространственного распределения карстовых форм, но и выявлять закономерности функционирования карстового массива как геологической системы, которые в дальнейшем могут быть использованы для построения прогнозных схем.

Системный подход к проблеме комплексного изучения карстового массива подразумевает рассмотрение исследуемого объекта как динамичной системы, предполагая, тем самым, анализ взаимодействия и взаимовлияния его структурных элементов. Системный подход здесь заключается в комплексном исследовании структурных элементов карстового массива на различных иерархических уровнях. Характеристика карстового массива, как любой сложной системы, считается полной, если установлен набор ее элементов с их параметрами, структурой и поведением [5].

Карстующиеся породы — это структурный элемент карстового массива, в пределах которого развивается процесс растворения, сопровождающийся формированием полостного пространства — вторичных пор, каверн, расширенных растворением трещин, полостей. Скорость процесса растворения, и, следовательно, морфометрия подземных карстопроявлений зависят от литологического типа карстующихся пород: если карстовый процесс в карбонатных породах может считаться «неразвивающимся» в масштабах времени, соизмеримого со сроком службы большинства инженерных сооружений [15] вследствие относительно низкой растворимости пород, то в условиях сульфатного карста, при скорости растворения в несколько, иногда и десятки, раз превышающей растворение карбонатов, возможно формирование весьма крупных карстовых полостей.

Различный характер растворения проявляется и в пределах одного литологического типа пород. Например, в карбонатах, в толще известняков, преимущественно в их прикровельной части, возможно формирование относительно крупных полостей и, как следствие, их выход на поверхность в виде провалов и оседаний поверхности; в тоже время в доломитах формируются главным образом зоны повышенной кавернозности и прослой доломитовой муки, которая кольматирует естественные пути фильтрации поверхностных и подземных вод

через массив, замедляя или вовсе приостанавливая карстовый процесс. При смешанном строении карстующейся толщи, представленном переслаиванием известняков и доломитов, активность развития карста может быть неоднократно повышена.

В. Н. Катаевым и И. Г. Ермолович в результате анализа данных бурения визейских отложений северного периклинального замыкания Главной Кизеловской антиклинали (Западный Урал) отмечено, что в толще карбонатных пород закарстованные и незакарстованные зоны распределяются по разрезу и латерали, согласно различию в литологическом типе и химическом составе пород. Известняки характеризуются единичными и относительно крупными кавернами и полостями, доломиты — скоплением каверн и пор, причем пористость и кавернозность пространственно тяготеют к тем прослоям, где развиты полости. Авторами отмечено, что карстовые полости крупного размера тяготеют к контактам известняков и доломитов [6].

В обстановках карбонатно-сульфатного карста крупные полости, инициирующие провалообразование, часто формируются на контакте сульфатных и перекрывающих их карбонатных отложений, вследствие восстановления агрессивности воды по отношению к сульфатам по причине снижения в ней концентрации сульфата кальция при растворении карбонатных пород по мере нисходящего движения воды по массиву (так называемое раздоломичивание). Большинство воронок в карстовых районах Пермского края сформировано под влиянием данного фактора [9, 12].

Предположение о том, что толщи, представленные сочетанием слоев сульфатного и карбонатного состава, растворяются лучше, чем толщи, сложенные только сульфатными породами, доказано результатами исследований скорости растворения гипсов и ангидритов, проведенных сотрудниками Кунгурской лаборатории-стационара Горного института УрО РАН и Пермского государственного университета в районе Кунгурской Ледяной пещеры [9].

Отметим, что максимальное развитие форм подземного карста в массиве связано, согласно принципиальной схеме гидродинамической зональности Г. А. Максимовича, с зоной периодического колебания уровня карстовых вод (переходной) [11]. Периоды интенсивного развития карстового процесса совпадают с сезоном высокой гидрогеологической активности, во то время как сухой сезон характеризуется низким уровнем грунтовых вод, медленной скоростью их циркуляции в карстовых системах, от двух до пяти раз меньшей, чем в течение сезона высокой гидрогеологической активности [17].

Эта особенность формирования полостей в растворимых породах массива подтверждена результатами наблюдений за режимом подземных вод, проведённых ВерхнекамТИСИЗом в 1971–1972 гг. (годовой цикл) на территории г. Кунгура. Исследователями отмечено, что усиление гидродинамической активности фильтрационного потока в послепаводковые периоды преимущественно в пределах зоны колебания уровней подземных вод является основной причиной возникновения карстовых деформаций на поверхности поймы, I и II надпойменных террас [7]. Большое значение имеет скорость изменения уровня воды: чем выше ее значение, тем интенсивнее может быть деформация поверхности земли, связанная с карстово-суффозионными процессами [18].

На основании вышесказанного можно отметить, что исследование литологического и химического состава карстующихся пород является весьма информативным в плане карстологического прогноза.

Краткая характеристика исследуемой территории

В рамках данного исследования предлагается оценить особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста. Изучаемая территория находится в Добрянском районе Пермского края. Участок расположен в 5 км севернее Мыса Стрелка — слияния рек Чусовой и Камы. Рельеф участка — сильно расчлененный долинами рек-притоков р. Камы, что благоприятствует интенсивной инфильтрации атмосферных осадков вглубь массива. Ранее автором при оценке инженерно-геологических условий и изменчивости состояния дисперсных отложений вблизи поверхностных карстовых форм была приведена весьма детальная характеристика природных условий данной территории [3].

Изучаемая территория расположена в пределах северо-восточной части Краснокамско-Полазненского вала северо-восточного простираения общей длиной около 100 км. Исследуемый участок находится на юге Полазненского поднятия — одной из структурных форм вала, характеризующихся наибольшей неотектонической активностью.

В геологическом строении района работ в приповерхностной части принимают участие породы пермской и четвертичной систем. Сводный геологический разрез изучаемого участка показан на рис. 1.

Четвертичные отложения представлены на высоких склонах элювиально-делювиальным генетическим типом: песчаными глинами, щебни-

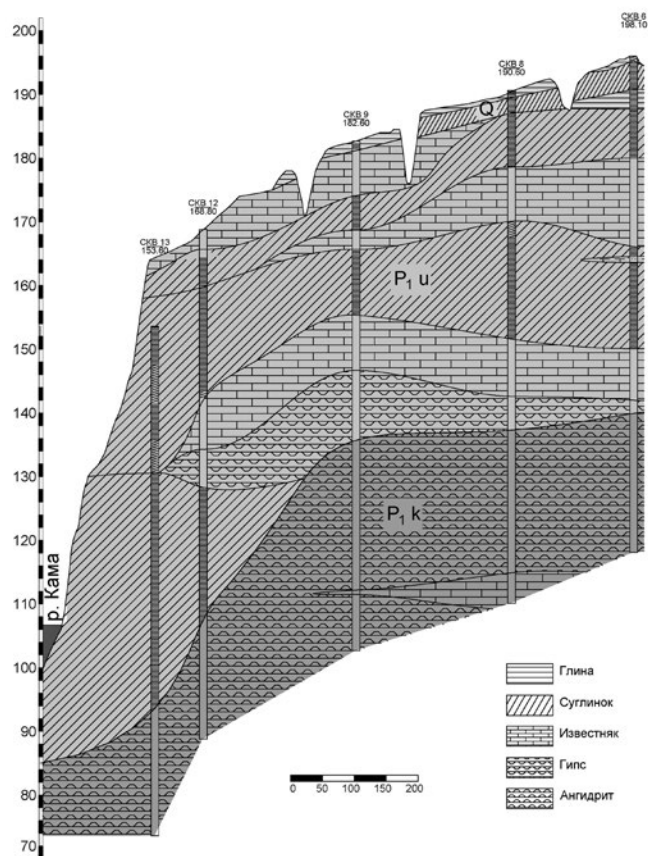


Рис. 1. Сводный геологический разрез изучаемого участка

стыми супесями и суглинками с линзами и гнездами песков, иногда гравийных грунтов. Водораздельные пространства с поверхности сложены бурыми и серо-коричневыми макропористыми известковистыми суглинками, супесями, реже глинами, с редкими включениями гальки.

В состав соликамского горизонта уфимского яруса (P_{1u}) нижней перми входят плитчатые мергели, известняки, доломиты, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Встречаются включения и линзы гипса и ангидрита. Иренинский горизонт кунгурского яруса (P_{1k}) нижней перми распространен повсеместно на изучаемой территории, на большей части подстилает уфимские отложения. На крутом абразионном склоне р. Камы (Чусовская Стрелка, Чусовской Мыс) встречаются обнажения пород горизонта, который представлен чередованием гипсово-ангидритовых и карбонатных литологических пачек, в составе последних выделяются преимущественно доломиты с прослоями мергелей, аргиллитов и известняков.

В районе работ, исходя из геологических данных, можно выделить водоносные горизонты и комплексы в четвертичных, соликамских и иренских отложениях. На изучаемом участке подзем-

ные воды развиты неравномерно в элювиально-делювиальных отложениях. Водоносный комплекс в соликамских отложениях расположен в трещиноватых известняках, доломитах, мергелях, песчаниках. Водоупором для комплекса служат иренские сульфатные породы или нетрещиноватые разновидности перечисленных выше пород и глин соликамского горизонта. Водоносный комплекс в иренских отложениях распространен на междуречье рек Камы и Чусовой, сложен чередующимися гипсово-ангидритовыми и известняково-доломитовыми пачками, водоносными только на участках их выхода на поверхность. С погружением под более молодые породы иренские отложения становятся водоупором. Отложения ниже эрозионного вреза в целом безводны и водонепроницаемы, трещины, способные в природных условиях фильтровать воду, отсутствуют.

Участок исследований находится в пределах западной части Полазненского (Полазнинско-Шалашинского) карстового района, характеризующегося развитием карбонатно-сульфатного и сульфатного типов карста в гипсах и перекрывающих их плитчатых трещиноватых известняках и доломитах, степенью трещиноватости и составом которых определяются морфология и плотность карстовых форм на участке. В целом трещиноватость, пористость и кавернозность пород создают единую гидравлическую систему, обеспечивающую движение воды в изучаемом карстовом массиве [8].

Большая часть поверхностных карстопроявлений является древними, их диаметры изменяются от 9 до 20 м при глубине до 6 м. При слиянии нескольких воронок образуются котловины диаметром 100 м и более, вытянутые параллельно логам [1, 2]. Примечательно, что в районах гипсового карста в Пермском крае преобладают провальные воронки, диаметр которых обычно в два раза больше, чем в районах развития карбонатного карста [10].

Большая часть крупных конусообразных и чашеобразных воронок приурочена к склонам речных долин. У бровок склонов расположены наиболее глубокие, иногда сложные, воронки и котловины. Вниз по склону размеры и количество воронок уменьшается. Это явление объясняется тем, что в коренных склонах долин и оврагов увеличивается трещиноватость, главным образом, за счет развития трещин бортового отпора. Кроме того, в верхних частях склонов отмечается небольшая мощность и более грубый состав покровных отложений, что при наличии трещин бортового отпора усиливает фильтрацию

воды. На ровной поверхности водораздела, где мощность покровных отложений увеличивается, плотность карстовых форм понижается и изменяется их форма. В условиях равнинного рельефа вынос глинистого материала происходит в замкнутые карстовые понижения, поэтому здесь 85,6% карстовых форм приходится на карстовые блюдца, озера и болота [1].

Методика проведения оценки

Для описанного участка проводилась оценка изменения содержания карбонатов в сульфатной толще, а также гипсов и ангидритов в толще карбонатных пород по мере удаления от поверхностных карстовых форм. Содержание карбонатов и сульфатов в грунтах было определено путем химического анализа солянокислой вытяжки из грунтов. Удаленность от карстовых воронок рассчитывалась инструментально в программе ArcGIS с применением инструмента Euclidean Distance с целью получения непрерывной растровой поверхности, характеризующей изменение данного параметра в метрах (рис. 2).

Изменчивость значений изучаемых инженерно-геологических свойств оценивалась путем прямого сопоставления посредством построения двухмерных облаков точек. Каждая пара значений, характеризующих положение точки на графике, описывалась координатами: ординатой (Y) — значением изучаемого параметра в точке опробования (содержание компонента, коэффициент размягчаемости); и абсциссой (X) — значением удаленности карстовых воронок, извлеченным с растровой поверхности в этой же точке.

Все используемые числовые значения переменных были приведены к единой шкале для совместного аналитического и графического анализа посредством нормализации по данной формуле:

$$x_{ind} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

где x_{ind} — нормированное значение параметра, диапазон изменения которого 0–1 (индексная оценка), x_i — реальное значение параметра, x_{min} — минимальное значение параметра в выборке, x_{max} — максимальное значение параметра в выборке.

Диапазоны реальных значений исследуемых параметров: содержание карбонатов 0–30% (в гипсовой толще), 0–50% (в ангидритовой толще), сульфатов 0–50% (в известняковой толще). Максимальное расстояние от исследуемой пробы до карстовой формы — 215 м.

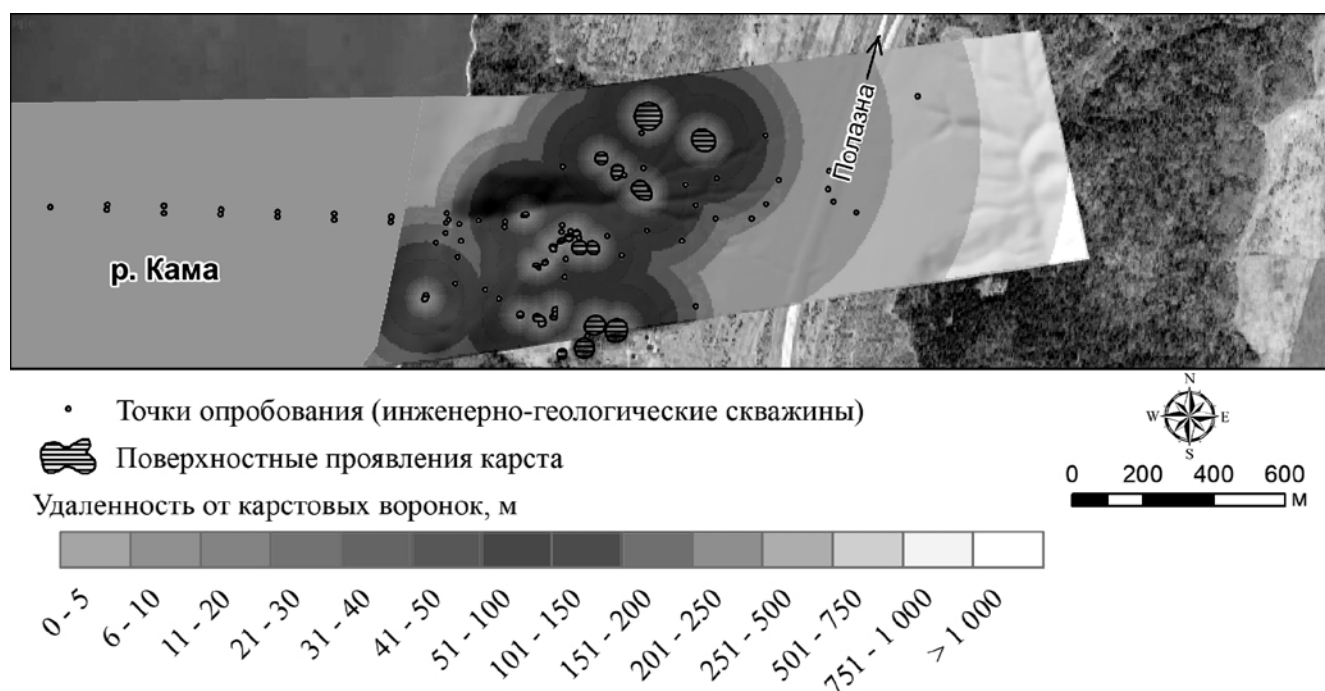


Рис. 2. Карта удаленности от карстовых воронок

Результаты и обсуждения

В результате прямого сопоставления значений были получены графики, отражающие характер изменчивости содержания карбонатов и сульфатов по мере удаления от поверхностных проявлений карста по прямой в горизонтальном направлении. Так, на участках развития карстовых воронок и близких к ним отмечалось повышенное содержание сульфатов в известняках; содержание карбонатов в сульфатах, наоборот, сокращалось [4].

Также в рамках исследования скальных грунтов на участке было проанализировано изменение по мере удаления от поверхностных проявлений карста коэффициента размягчаемости — величины, характеризующей способность скальных и полускальных грунтов снижать свою прочность после водонасыщения. Для карбонатных пород отмечался рост этого коэффициента по мере удаления от карстовых форм [4]. Иными словами, прочность растворимых пород в непосредственной близости к карстовым формам при водонасыщении снижается относительно меньше таковой здесь же в естественных условиях. Это, скорее всего, объясняется тем, что в непосредственной близости к карстовым формам грунты в естественном залегании уже характеризуются относительно повышенным водонасыщением вследствие хорошей инфильтрации пресных вод через дно карстовых воронок. Так, над выветрелыми зонами в карстующихся породах за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемости массива, влага в верхних горизонтах не задерживается, а просачивается вглубь мас-

сива [16]. Кроме того, так как разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт на изучаемой территории контролируется карстовыми воронками, то в местах их скоплений и близких к ним выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постгенетических изменений в грунтах в области движения подземных вод.

Очевиден факт малой информативности графиков двухмерных облаков точек [4] при использовании их для прогнозирования; они лишь позволили оценить тенденцию в изменении исследуемых параметров в зависимости от удаленности от карстовых форм и сделать вывод о наличии нелинейной функциональной зависимости между исследуемыми параметрами. Однако, несмотря на видимую хаотичность изменяемости изучаемых показателей, в своем распределении значений на каждом интервале удаленности от карстовых воронок они подчиняются определенной закономерности, которая в большинстве случаев отвечает закону нормального распределения. Получить информацию об имеющемся тренде позволила операция осреднения значений исследуемых параметров карстовых форм в равных интервалах значений удаленности.

В рамках данной работы была предпринята попытка аппроксимировать полученные зависимости, чтобы найти уравнение, описывающее аппроксимирующую кривую (искомое прогнозное уравнение). Выбор прогнозной кривой осуществлялся аналитическим методом в результате вычленения из общего облака точек как можно большего количества тех из них, которые находятся в максимальной

близости к выявленному тренду с последующим определением функциональной зависимости и величины достоверности аппроксимации — R^2 (рис. 3).

Данная процедура производилась с использованием Microsoft Office Excel и средств VBA for Excel, позволяющих в автоматизированном режиме с учетом указанного тренда и характера зависимости вычленивать необходимые точки и выстроить наиболее оптимальную прогнозную кривую. Основные условия, заложенные в алгоритм, заключались в необходимости построения прогнозной кривой не менее, чем по 35–40% данных от первоначальной исследуемой совокупности и уровне корреляции рассматриваемых величин, превышающем 0,7.

Согласно СП 11–105–97, ч. II (п. 5.2.11) и «Руководству по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» [14], вокруг существующих карстопроявлений следует выделять и обособлять в ходе зонирования по степени удаленности:

- зону условно благоприятную для строительства (удаленность от карстопроявлений более 50 м);
- зону неблагоприятную для строительства (удаленность от воронок от 20 до 50 м);
- зону опасную для строительства (удаленность от воронок менее 20 м).

На основании полученных закономерностей предлагается расширить границы неблагоприятной и опасной зон. Так, в отношении содержания карбонатов в сульфатах, согласно намеченной зависимости на расстоянии около 200 м (0,9 ind, рис. 3), наблюдается относительно резкое увеличение содержания карбонатов (15% и более). В отношении содержания сульфатов, наоборот, на расстоянии 20 м наблюдается относительно резкое его сокращение (до 14%). Однако, принимая во внимание тот факт, что загипсованность массива увеличивает скорость растворения карстующихся отложений, предлагается участки с загипсованными карбо-

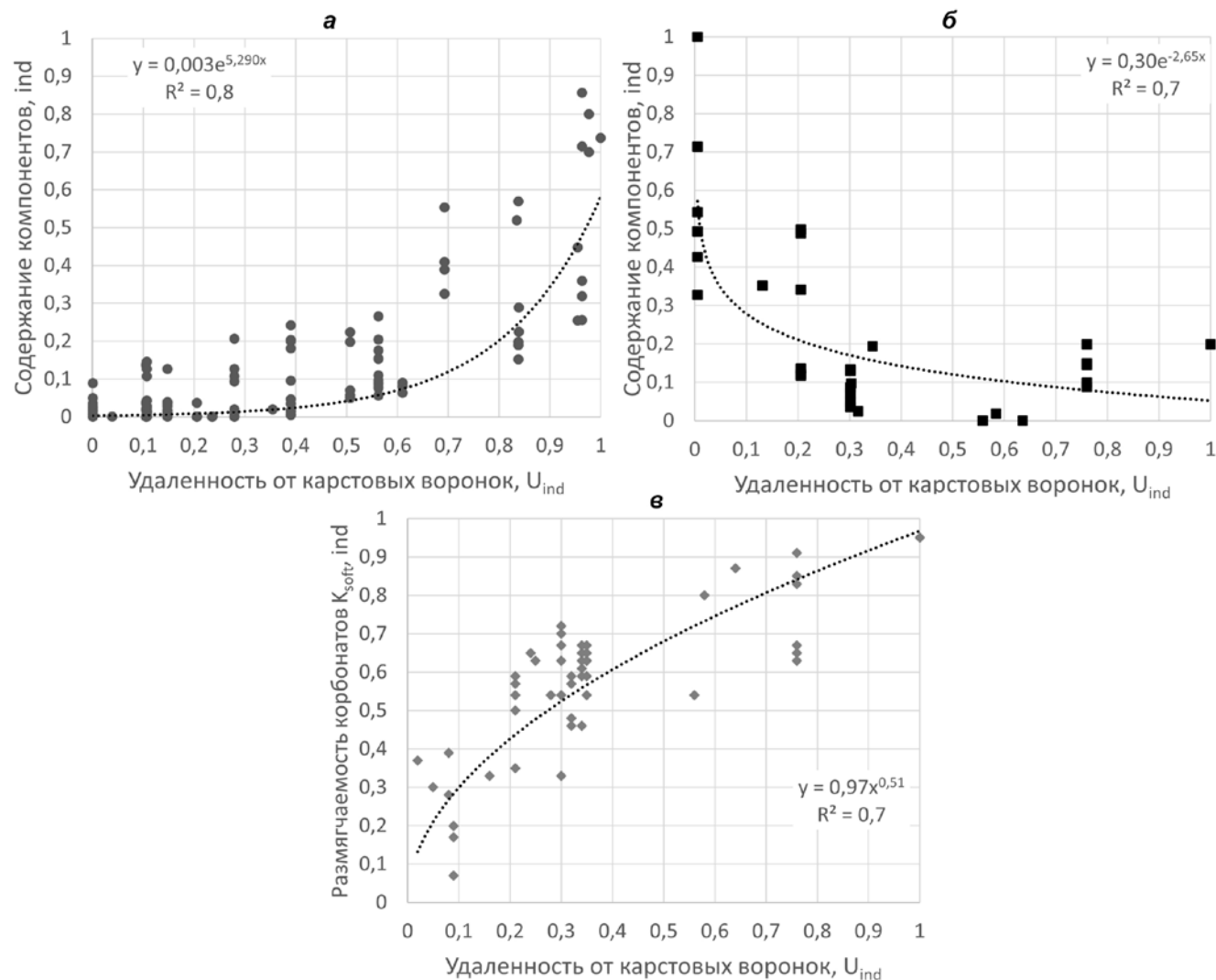


Рис. 3. Графическое представление исследуемых закономерностей изменения значений: а – содержания карбонатов в сульфатах, б – содержания сульфатов в карбонатах, в – коэффициента размягчаемости карбонатов, в зависимости от удаленности от карстовых воронок

натами (до 14%) также включить в потенциально опасную зону. Еще А. И. Печеркиным и В. Е. Закоптеловым отмечалось, что примесь более растворимых соединений значительно повышает растворимость породы и наоборот [13]. Размягчаемость карбонатов увеличивается плавно и на расстоянии до 20 м не превышает 0,79.

По частным значениям определений изучаемых параметров методом интерполяции строились растровые модели и с использованием выявленных функциональных зависимостей выделялись потенциально опасные в карстовом отношении интервалы (рис. 4), которые рекомендуется также окон-

турить при зонировании территории как участки неблагоприятные, а в некоторых случаях и опасные в отношении карста.

Выводы

- 1. В пределах изучаемой территории участки, характеризующиеся широким развитием поверхностных проявлений карстового процесса, характеризуются повышенным содержанием сульфатов в карбонатных породах.
- 2. Снижение прочностных свойств растворимых пород при водонасыщении заметнее проявляется по мере удаления от карстовых воронок.

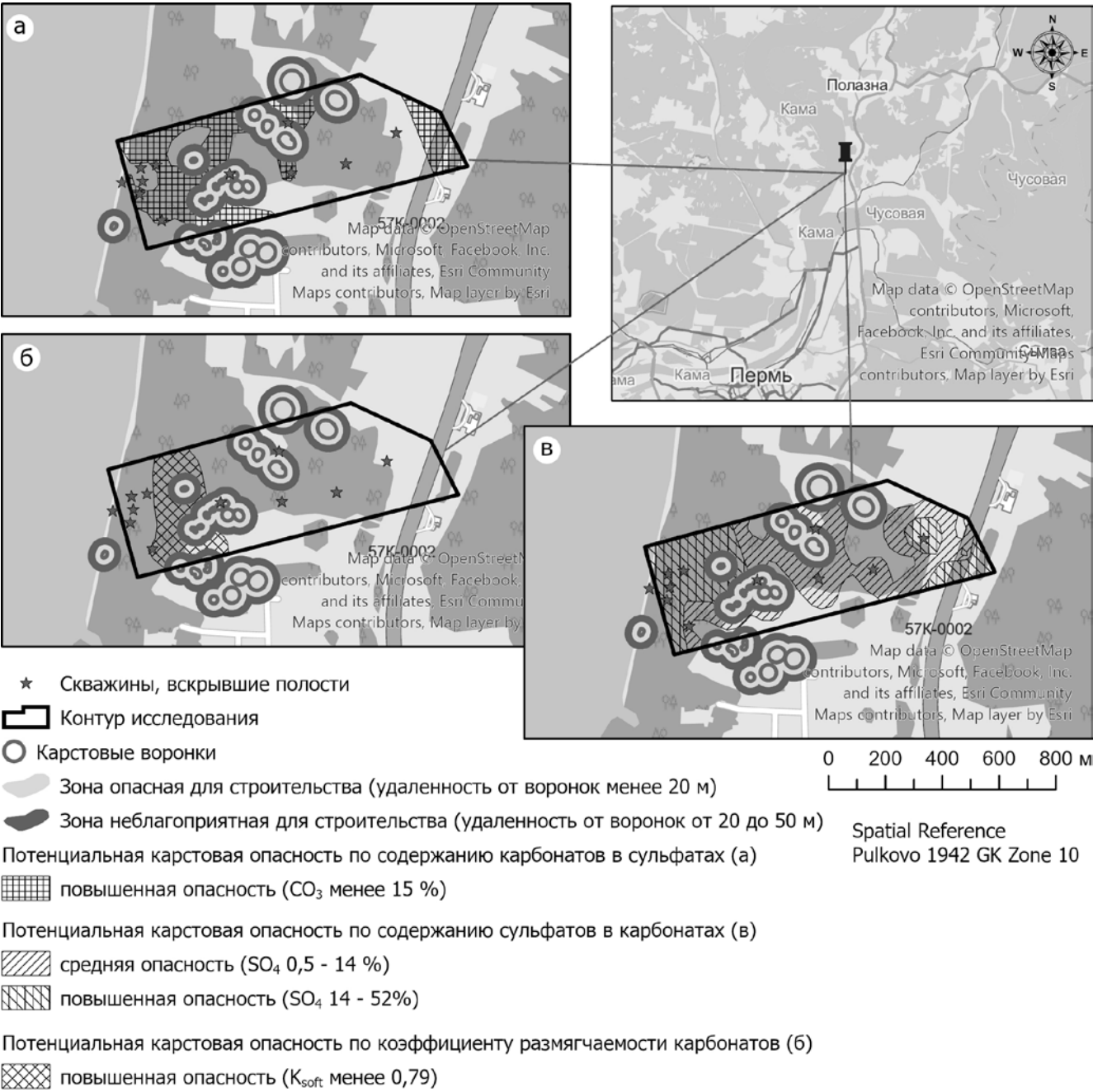


Рис. 4. Прогнозные картографические схемы карстовой опасности, построенные с использованием выявленных зависимостей

3. Поиск закономерностей в изменении свойств различных элементов карстового массива, в частности растворимых грунтов, согласно идее системного подхода в изучении карстовых массивов, может оказаться весьма эффективным при проведении оценки карстовой опасности.

4. Использование выявленных зависимостей между исследуемыми параметрами карстующихся пород и удаленностью от карстовых форм при зонировании территории позволяет выделять потенциально опасные в карстовом отношении участки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутырина К. Г. Гипсовый карст центральной части Пермской области. Дисс. канд. географ. наук / Перм. ун-т. Пермь, 1968. 380 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. Дробинина Е. В., Золотарев Д. Р. Анализ инженерно-геологических условий и изменчивости состояния дисперсных отложений вблизи поверхностных карстовых форм в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 2. 2022. С. 48–62.
4. Дробинина Е. В. Особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). Москва: изд-во «ГеоИнфо», 2022. С. 169–181.
5. Катаев В. Н. Основы структурного карстования. Пермь, 2004. 143 с.
6. Катаев В. Н., Ермолович И. Г. Структурно-текстурные ассоциации, трещиноватость и закарстованность карбонатных пород // материалы VI Всероссийского литологического совещания «Концептуальные проблемы литологических исследований в России». Т. 1. Казань, 2011, С. 367–371.
7. Катаев В. Н., Кадебская О. И. Геология и карст города Кунгура. Пермь: Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН, 2010. 236 с.
8. Килин Ю. А., Минькевич И. И. Карст Чусовского Мыса Камского водохранилища // Инновационный потенциал естественных наук. Том II. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. Пермь, 2006. С. 91–94.
9. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под. ред. д.г.-м.н. В. Н. Дублянского. Екатеринбург, 2005. 376 с.
10. Максимович Г. А. Карст гипсов и ангидритов земного шара (Геотектоническая приуроченность, распространение и основные особенности) // Общие вопросы карстования. М., 1962. С. 108–113.
11. Максимович Г. А. Основы карстования. Т. 1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 447 с.
12. Печеркин А. И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск, 1986. 172 с.
13. Печеркин А. И., Закоптелов В. Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ. Пермь: Перм. ун-т, 1982. 88 с.
14. Саваренский И. А., Миронов Н. А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИС, 1995. 167 с.
15. Толмачев В. В., Ройтер Ф. Инженерное карстование. М.: Недра, 1990. 151 с.
16. Chen, X., Zhang, Z., Chen, X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. Environ Earth Sci 59, 811–820 (2009). <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>
17. Milanović P. Water resources engineering in karst. Boca Raton, Florida, USA, 2005. 328 p.
18. Xiao X., Xu M., Ding Q. et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes // Environ. EarthSci. 2018. 77(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7102-y>.