

УДК 556.314+624.131.1

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
КАРСТООПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ
(на примере г. Кунгур)**

C.B. Щербаков, B.N. Катаев

Аннотация

Приведена методика интегральной оценки карстоопасности урбанизированных территорий, базирующаяся на одновременном учете множества показателей строения закарстованного массива горных пород. Обоснован математический аппарат и методы вероятностно-статистического анализа, применяемые для оценки опасности воздействия карста. При помощи предложенных методов построены карты карстоопасности территории г. Кунгур, максимально учитывающие весь набор входных данных. Проверка точности оценки при построении карт осуществлена на базе заверочного бурения скважин и исследования распределения карстопроявлений, а также их морфометрических параметров по выделенным категориям опасности.

Ключевые слова: карст, карстоопасность, показатели строения территории, особенности распределения карстовых форм.

Введение

Проблема безопасного освоения закарстованных территорий является одной из ключевых при оперативном территориальном планировании, разработке генеральных планов развития городских и градопромышленных агломераций, градостроительстве. Проблема обусловлена реальными рисками, связанными с карстовыми и карстово-суффозионными деформациями поверхности земли, часто имеющими внезапный провальный характер. Прогноз вероятности возникновения деформационных карстовых явлений на развивающихся промышленных и урбанизированных территориях носит в этом ключе обязательный характер.

В настоящее время к практическому использованию рекомендовано большое количество всевозможных способов оценки и прогнозирования карстовой активности на различных масштабных уровнях, причем основанных не только на установленных закономерностях пространственного проявления карста на поверхности земли. В практике инженерной геологии закарстованных территорий известны методы изучения динамики форм и параметров отдельных карстовых полостей вплоть до формирования провалов на поверхности земли, методы определения прогнозного диаметра провала под сооружением, методы параметрического влияния подземного потока (ионный состав подземных вод, их скорость и характер движения), методы количественного выражения процесса растворения и т. д. [1–3]. Одно из последних обобщений современных методических подходов к оценке карстоопасности изложено в 2002 г. в 3-м томе

6-томного монографического издания Российской академии наук «Природные опасности России» [4].

Ряд наиболее универсальных методов карстологической оценки устойчивости территорий закреплен в нормативных документах [5–9], а также в различных руководствах и рекомендациях [10, 11]. Нормативные методы оценки устойчивости закарстованных территорий, как правило, ориентированы на применение и учет отдельных факторов и параметров процесса или некоторой их совокупности, обуславливающих активность проявления карста. Это прежде всего касается оценки пространственного распространения поверхностных карстовых форм с учетом времени их образования и их соответствующих морфометрических параметров, основным из которых является средний диаметр. Такой подход не позволяет в полной мере получить информацию о характере и направленности развития карстового процесса в целях построения прогнозной территориальной модели, так как базируется на оценке поверхностного распределения карстовых форм без достаточного анализа их связи со строением массива горных пород. Однако именно состояние закарстованного массива в первую очередь определяет интенсивность и направленность протекания карстового процесса, а следовательно, рассмотрение составляющих геологического, гидрогеологического, структурно-тектонического, геоморфологического, инженерно-геологического строения в совокупности с пространственным распределением зафиксированных карстовых деформаций, формирует целостную и объективную картину реальной карстовой опасности в пределах исследуемой территории [12].

1. Показатели строения массива и методика их учета

Строение закарстованного массива, в пределах которого расположена территория г. Кунгур, характеризуется повышенной сложностью. Структурно-тектонический план территории, сформировавшийся в мезозойско-кайнозойскую эпоху, представлен сложной сетью дизъюнктивов различного порядка, пронизывающих массив и фиксируемых в данных условиях соответствующими линеаментами [13, 14].

Литологическая изменчивость толщ по разрезу и по простиранию, невыдержанность по мощности отдельных, относительно однородных по литологии прослоев являются характерными особенностями геологического строения исследуемой территории. В гидрогеологическом отношении сложность динамики подземных вод и их химизма во многом определяется структурно-тектоническим и геологическим строением. Инженерно-геологические условия характеризуются присутствием в разрезе специфических и слабых грунтов (торфа и просадочных суглинок) и интенсивным влиянием на свойства грунтов техногенных факторов, геоморфологическая обстановка – комплексом речных террас, сформированных в долинах развитой речной сети. Геоморфологический облик территории в значительной степени сложился в условиях определенных этапов тектонической и особенно неотектонической активности начиная с олигоцена [15].

Оценка карстоопасности территории, как правило, базируется на группе признаков и параметров и осуществляется с применением ряда методик. Наиболее общая схема для осуществления такой оценки должна включать в себя всесторонний анализ природной обстановки исследуемой территории. Природные

условия складываются из комплекса геологических, гидрогеологических, геоморфологических, структурно-тектонических и инженерно-геологических параметров ее строения. Каждый отдельный признак включает группу частных показателей (табл. 1). Отдельный набор частных показателей по ряду признаков может быть использован для решения задач по оценке карстоопасности. Например, первые шесть показателей гидрогеологического строения являются взаимодополняющими и детализируют характер карстовой опасности в зависимости от конфигурации гидродинамических зон.

Табл. 1

Показатели, используемые при оценке карстоопасности на территории г. Кунгур

<p>Показатели геоморфологического строения:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Абсолютные отметки рельефа поверхности земли, м; • Надпойменные террасы и их уступы; • Уклон земной поверхности, градусы; • Экспозиция склона, градусы <p>Показатели геологического строения:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Строение по геологическому разрезу, тип; • Мощность четвертичных дисперсных отложений, м; • Мощность неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений, м; • Общая мощность четвертичных и неоген-четвертичных отложений, м; • Глубина залегания кровли иренских сульфатно-карbonатных отложений, м; • Глубина залегания кровли неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений, м; • Подземный рельеф кровли неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений, абр. м; • Подземный рельеф кровли иренских сульфатно-карbonатных отложений, абр. м <p>Показатели структурно-тектонического строения:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Линейная плотность линеаментов, км/км²; • Плотность пересечений линеаментов, шт./км²; • Показатель тектонической блочности, км² 	<p>Показатели гидрогеологического строения:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Глубина залегания вод четвертичного аллювиально-делювиального комплекса, м; • Глубина залегания подземных вод неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений, м; • Глубина залегания подземных вод иренских карbonатно-сульфатных отложений, м; • Уровень подземных вод четвертичного аллювиально-делювиального комплекса, абр. м; • Уровень подземных вод неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений, м; • Уровень подземных вод иренских карbonатно-сульфатных отложений, м; • Средняя минерализация вод иренского водоносного горизонта, г/дм³; • Фациальный состав подземных вод иренских карbonатно-сульфатных отложений (по Г.А. Максимовичу), первые три преобладающие по составу химические компоненты <p>Показатели инженерно-геологического строения:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Плотность основных разновидностей дисперсных грунтов четвертичных отложений, г/см³; • Коэффициент пористости основных разновидностей дисперсных грунтов четвертичных отложений, д.е.
--	--

Количество частных показателей может варьировать в зависимости от их значимости применительно к конкретному участку с конкретным строением, характера решаемой задачи, типа исследуемой территории. Другими словами, набор показателей, приведенный в табл. 1, может быть изменен – дополнен или сокращен. Оптимальный набор количественных и качественных показателей в каждой отдельной группе определяется в результате последовательной операции картографического моделирования (построения серии карт пространственного распределения соответствующего показателя), отражающей в итоге тренды изменения показателей в геологическом пространстве.

Создаваемая картографическая модель с определенной точностью и достоверностью отражая реальную картину строения геологической среды, содержит дискретные данные, получаемые по результатам инженерно-геологических изысканий, специализированных и комплексных геолого-съемочных работ, иных тематических работ, включая и карстологические. Применительно к урбанизированным территориям наиболее емкими по содержанию первичных параметров состояния геологической среды являются результаты буровых работ и последующего лабораторного анализа керна, проб грунта и воды.

Очевидно, что количество показателей строения массива в пределах определенного участка исследуемой площади контролируется типом геологического разреза: характером и последовательностью сочетания в разрезе пластов различного литологического состава, количеством и глубиной пройденных горных выработок, частотой опробования пробуренных интервалов.

На территории г. Кунгур по результатам проведенных исследований выделено 7 основных типов геологического разреза (рис. 1, 2). Согласно этим данным на половине исследуемой территории в разрезе отсутствуют иренские карбонатно-сульфатные отложения, фрагментарно из разреза выклиниваются неоген-четвертичные обвально-карстовые отложения.

В пределах исследуемой территории пройдено 3718 горных выработок, большинство из которых являются скважинами. Пройденные в инженерно-геологических целях скважины, глубины которых не превышают 10–15 м, как правило, не вскрывают коренных карстующихся отложений, следовательно, при определении карстовой опасности используется неполный комплекс анализируемых показателей. Аналогично, часть мелких скважин, не вскрывших первого от поверхности водоносного горизонта, приводит к уменьшению количества гидрогеологических показателей, используемых при оценке карстовой опасности.

Опыт карстологической оценки урбанизированных территорий свидетельствует о том, что при проведении анализа устойчивости исследуемой территории необходимо по возможности применять принцип «унификации показателей» – использовать постоянное число однотипных показателей. Другими словами, анализ, выполненный по n -му количеству скважин, в k случаях которых присутствует 10 прогнозных показателей строения карстового массива, а в m случаях – 1–3 прогнозных показателя, ведет к неизбежным погрешностям при оценке карстоопасности.

На результат определения карстоопасности исследуемой территории оказывает влияние и удельная плотность сети горных выработок. Так, в пределах территории г. Кунгур степень изученности территории горными выработками

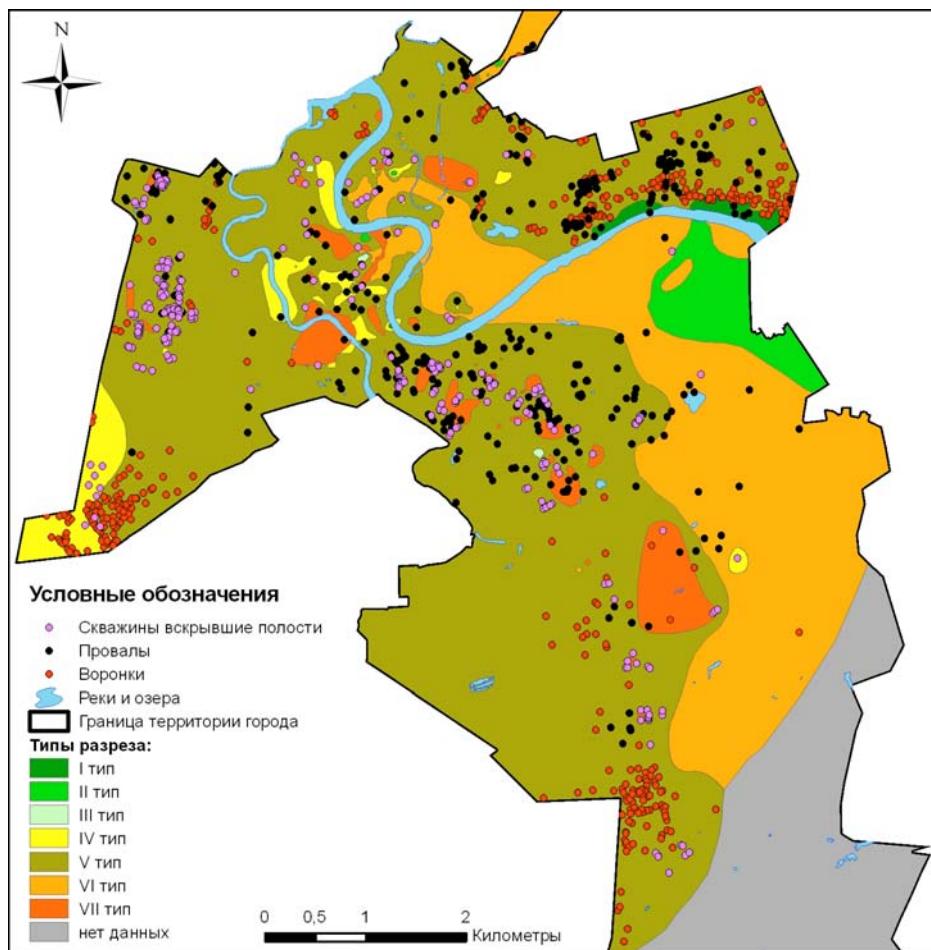


Рис. 1. Карта распространения типов геологического разреза и карстовых форм в пределах северной части территории г. Кунгур

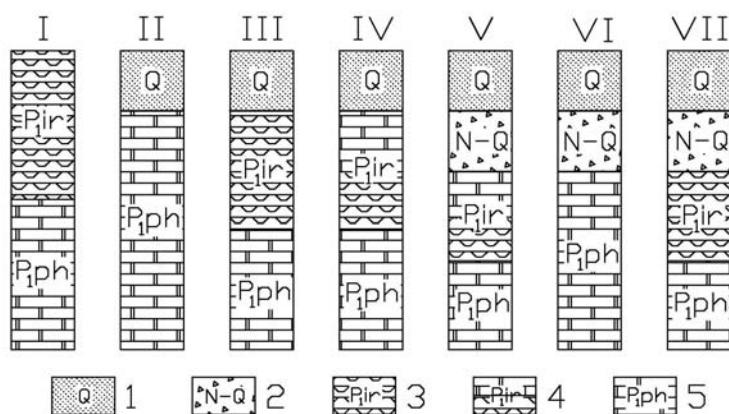


Рис. 2. Основные типы геологического разреза, выделенные на территории г. Кунгур. Условные обозначения: 1 – аллювиально-делювиальные отложения четвертичного возраста; 2 – обвально-карстовые отложения неоген-четвертичного возраста; 3 – сульфатные отложения иренского горизонта; 4 – сульфатно-карбонатные отложения иренского горизонта; 5 – карбонатные отложения филипповского горизонта

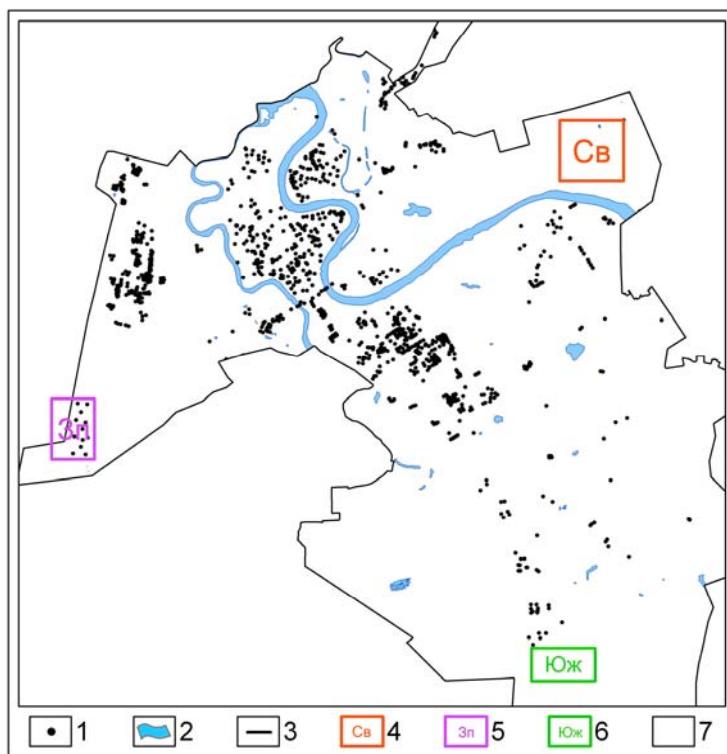


Рис. 3. Расположение скважин и участков, проблемных при оценке карстоопасности на территории г. Кунгур: 1 – скважины; 2 – реки и озера; 3 – граница города; 4 – участок в северной части города; 5 – участок на западе территории города; 6 – участок в южной части территории города; 7 – исследуемая площадь

неоднородна (рис. 3). Здесь выделяются три участка, в пределах которых широко развиты карстовые воронки, но при этом буровые работы «на карст» представлены единичными случаями. Соответственно, карты, получаемые автоматизированным путем без ручной корректировки, в пределах этих территорий не могут считаться кондиционными, поскольку они не обеспечены информационными ресурсами. Эти карты отражают ошибочную информацию о карстовой опасности.

Совокупный учет всех показателей строения территории позволяет получать интегральную оценку карстоопасности на основе обобщения всех имеющихся данных. Однако в этом случае перед исследователем стоит вопрос, каким образом наиболее оптимально увязать особенности строения изучаемой территории с карстовым процессом, активно протекающим в ее пределах. Ответ на данный вопрос может быть найден через рассмотрение пространственной связи каждого отдельного показателя с карстовыми формами, развитыми в пределах участка исследований, среди которых могут быть как поверхностные (провалы, воронки, лога, котловины), так и подземные карстопроявления (полости). Пространственное соотношение зафиксированных форм карста и особенностей строения массива, выраженного посредством частных показателей, отражает влияние этих особенностей на локализацию карстовых явлений и форм.

Основой для получения закономерностей распределения карстовых форм относительно особенностей строения массива являются карты распределения конкретных значений показателей строения, выраженные в изолиниях и совмещенные с зафиксированными карстовыми деформациями поверхности (провалами, воронками) и подземными полостями. С помощью этих карт строятся гистограммы соответствующих распределений. По оси абсцисс гистограммы откладываются значения изучаемого показателя, разбитые на классы-интервалы, а по оси ординат – количество карстовых форм в штуках. Гистограмма несет информацию об эмпирическом распределении провалов, воронок и полостей, а также о суммарном распределении всех типов карстовых форм по параметрическим интервалам изучаемого показателя.

Учет и анализ распределений карстопроявлений относительно значений частных показателей геолого-гидрогеологического строения закарстованного массива с применением определенных принципов и методов позволяют оценивать характер карстовой опасности на исследуемой территории.

2. Экспертная оценка карстоопасности

Совместный учет всех показателей при прогнозных построениях в целях определения карстоопасности наиболее просто достигается путем экспертной оценки распределений карстовых форм по фиксируемым показателям строения территории. Экспертная оценка подразумевает выделение в составе всей совокупности признаков-факторов, действующих в рамках конкретного показателя и влияющих на распределение карстовых форм, трех интервалов: одного опасного и двух неопасных. Границы между условно опасным и неопасными интервалами устанавливаются по резкому уменьшению (увеличению) количества карстопроявлений на гистограммах частоты их встречаемости соответственно значениям конкретного показателя строения территории (рис. 4). В пределы опасного интервала «попадает» наибольшее количество карстопроявлений. Нетрудно заметить, что такая оценка носит субъективный характер.

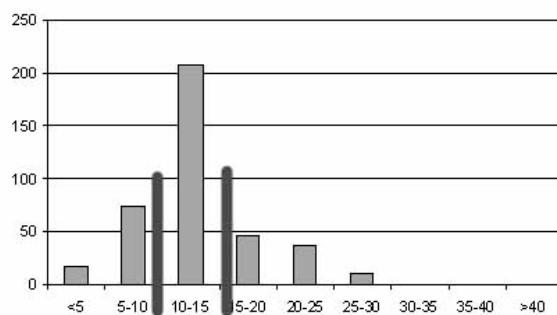


Рис. 4. Экспертное выделение опасных и неопасных интервалов исследуемых показателей (жирными линиями выделены границы опасного интервала)

В случае нескольких максимумов встречаемости карстовых форм по значениям исследуемого показателя (неоднородность распределения) может быть выделено два и более опасных интервала, обрамленных неопасными интервалами.

Переход от качественной идентификации интервалов опасности к количественной наиболее просто осуществим через введение балльных значений. Так, территории, относящиеся к опасному интервалу, кодируются баллом 2, к неопасному – 1. Суммирование баллов по разным показателям, например полученным в результате проходки конкретной горной выработки, дает некоторую обобщенную числовую характеристику опасности в пределах пункта размещения выработки в карстовом массиве. Следовательно, подобная оценка по группе скважин в пределах территории исследований дает относительно целостное представление о степени карстовой опасности. Чем больше суммарный балл по всем анализируемым показателям, тем выше степень карстоопасности, и наоборот.

3. Оценка карстоопасности вероятностно-статистическим методом

Известно, что распределение практически всех показателей состояния природной среды, и в частности показателей строения карстового массива в пределе, как правило, приближается к нормальному или логарифмическициальному виду. Это связано с тем, что на любой геологический объект или процесс в природе действует большое число случайных факторов. Логично предположить, что подобного рода распределение присуще и карсту и связанным с ним процессам и явлениям. На сегодняшний день известно, что распределение карстовых провалов по диаметрам в пределах какой-либо изучаемой территории носит логнормальный характер [16, 17]. Отметим также, что распределения карстовых провалов по времени возникновения подчинено закону редких событий и хорошо описывается через распределение Пуассона, которое, в свою очередь, при увеличении числа наблюдений приближается к нормальному закону [17]. В большинстве случаев пространственное распределение подземных и (или) поверхностных карстовых форм в максимальном количественном выражении тяготеет к участкам, которые характеризуются средними числовыми значениями показателей геологического-структурного или геолого-гидрогеологического строения. Эта особенность развития карста была уже подмечена ранее и получила название «эффект средних значений» [18]. Данное обстоятельство указывает на наличие нормальности распределения исследуемых данных.

С учетом вышесказанного закономерным выглядит теоретическое предположение о нормальности распределения карстовых форм относительно значений показателей строения карстового массива. Данное положение в первом приближении подтверждается результатами графического анализа распределения карстопроявлений относительно интервалов значений показателей строения природной среды в пределах г. Кунгур, представленных в форме гистограмм. Однако стоит отметить и то, что карстопроявления в числовом выражении могут группироваться вблизи минимальных или максимальных значений исследуемого показателя, тем самым отклоняясь от средних значений. Такие распределения часто могут быть описаны через логнормальный закон (прямой или обратный) или некоторый третий закон, основанный на нормализации числовых значений анализируемого показателя строения территории по определенным правилам. Кроме того, в условиях площадной ограниченности исследуемой территории интервалы изменчивости ряда рассматриваемых показателей (минимальных и максимальных значений) оказываются усеченными, что зачастую приводит

к отклонениям от нормального закона распределения. Резкие отклонения от нормального закона возможны также при начальной точке отсчета числовых значений показателя, равной нулю. В таких случаях распределение карстовых форм наиболее удобно описывать с помощью экспоненциального закона распределения. Примером таких показателей могут служить абсолютные отметки залегания тех или иных отложений, а также уклоны поверхности рельефа.

При расчетах для выявления степени соответствия эмпирического распределения логнормальному первоначальные данные исследуемого показателя логарифмируются, при этом используются либо десятичные, либо натуральные логарифмы. В том случае, когда эмпирическое распределение имеет некоторый промежуточный вид между нормальным и логнормальным, применяется искусственная нормализация случайной величины исследуемого показателя путем ее следующего преобразования:

$$z = \ln \frac{x}{a - x}. \quad (1)$$

Здесь a – постоянный член, определяемый по формуле:

$$a = x_{\max} + l, \quad (2)$$

где x_{\max} – максимальное значение исследуемого показателя; l – размер класса-интервала для данного показателя.

Эффективность нормализации по формуле (1) характерна для показателей строения массива, значения которых изменяются в пределах от 0 до некоторого значения a .

Для всех эмпирических распределений по частным показателям строения карстового массива на территории г. Кунгур были рассчитаны стандартные статистические характеристики: среднее значение $x_{\text{ср}}$, дисперсия σ^2 , стандартное отклонение σ , коэффициент вариации V , асимметрия A и эксцесс E . По их значениям определяются уравнения интегральной и дифференциальной функций распределения теоретических законов. Вид экспоненциального закона распределения определяется с использованием метода наименьших квадратов путем предварительного логарифмирования и линеаризации зависимости:

$$P = ae^{\lambda x} \Rightarrow \lg P = \lg a + \lambda x \lg e \Rightarrow \lg P = A + Bx, \quad (3)$$

где a и λ – параметры экспоненциального распределения; e – экспонента; x – значение исследуемого показателя.

По вычисленным статистическим характеристикам с учетом определенных критериев делается вывод о схожести наблюдаемого распределения с нормальным, логнормальным или нормализованным (приведенным к нормальному). Экспоненциальное распределение устанавливается без применения аналитической статистики только лишь на основании анализа гистограмм. Проверку соответствия наблюдаемого распределения семейству нормального закона рекомендуется проводить с использованием ряда критериев: это критерий нормального закона, критерий хи-квадрат и критерий Колмогорова. Все эти критерии основаны на определении эмпирических или наблюдаемых значений некоторого расчетного показателя и сравнении этих значений со значением, характерным для теоретических распределений. Такое сравнение проводится с учетом уровня

значимости α , то есть вероятности ошибки при сопоставлении эмпирического и теоретического распределений и отнесении первого к последнему.

Ввиду типовых отличий и различий продолжительности по времени стадий развития рассматриваемых карстопроявлений, а также широкой изменчивости в пределах изучаемой территории показателей строения карстового массива (геолого-гидрогеологические условия, физико-механические свойства грунтов и др.) даже на сравнительно небольших площадях значение уровня значимости в расчетах рекомендуется принимать равным 0.001. Данное предположение приводит к огрублению конечных результатов и менее точному описанию эмпирического распределения теоретическим законом. Однако с учетом вышеописанной дифференциации, характерной для карста и площадей его распространения, такой подход позволяет описывать действительную картину известными теоретическими закономерностями.

Все предлагаемые критерии широко известны в математической статистике, в связи с чем в настоящей статье они не рассматриваются. Следует лишь заметить, что критерий хи-квадрат является наиболее универсальным и точным среди всех критериев нормальности. Если исследуемое распределение по данным этого критерия является нормальным, то вопреки результатам, полученным по критериям нормального закона и Колмогорова, принимается нормальность распределения. В то же время принятие гипотезы о нормальном распределении только по критерию Колмогорова ввиду его непараметрической основы не имеет достаточного веса для окончательного вывода и требует частичного подтверждения наблюдаемой зависимости, хотя бы по критерию нормального закона. Сам по себе критерий нормального закона в случае карстологической оценки является вполне самодостаточным, и по его сходимости нормальность распределения исследуемых данных принимается доказанной.

Применение статистического аппарата при любых исследованиях, в том числе и при оценке карстоопасности и устойчивости территорий, эффективно только в случае анализа однородных совокупностей данных. Имеющаяся неоднородность первоначальной выборки приводит к искажению действительных значений статистических характеристик и, как следствие, к неверным конечным выводам. Неоднородности фиксируются по точкам минимума на диаграммах распределения карстовых форм относительно значений параметров строения массива. Если исследуемая совокупность явилаась неоднородной, то в дальнейших расчетах она разделяется на две однородные, граничащие в точке минимума или имеющие один общий крайний смежный класс. Все статистические характеристики рассчитываются для каждой из вновь выделенных однородных совокупностей.

Наблюдаемые неоднородности в распределении карстопроявлений по классам-интервалам исследуемых параметров могут иметь случайный характер. К таким неоднородностям относятся, например, незначительные падения частоты встречаемости карстовых форм на общем фоне возрастания значений изучаемого показателя при переходе от одного класса-интервала к другому. Подобные локальные неоднородности хорошо выявляются графоаналитически по гистограммам и таблицам эмпирического распределения и, как правило, несущественно влияют на конечные результаты.

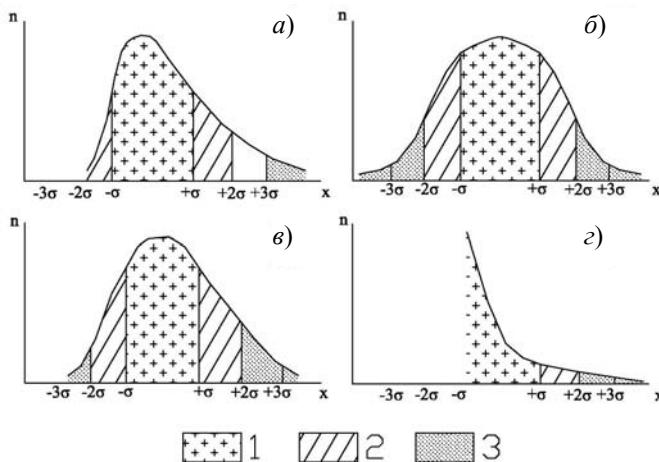


Рис. 5. Категории карстовой опасности по интервалам значений показателя на дифференциальной кривой распределения: а) логарифмически нормального, б) нормального, в) нормализованного, г) экспоненциального; категории опасности: 1 – опасная, 2 – потенциально опасная, 3 – практически неопасная

Данные картографического и графического моделирования, позволяющие устанавливать наиболее опасные интервалы, к которым приурочены максимумы встреченных карстовых форм, не позволяют однозначно и объективно обосновывать границы этих опасных интервалов. Это же касается и экспертного метода, описание которого приведено выше. Совершенно очевидно, что необходим общий механизм выделения подобного рода категорий, общий для всех изучаемых показателей геолого-гидрогеологического строения и других учитываемых свойств геологической среды. В данном случае критериальное доказательство схожести того или иного эмпирического распределения с теоретическим нормальным законом позволяет в одинаковой степени оценивать интервалы максимальной локализации карстовых проявлений. Такие интервалы предлагаются выделять, опираясь на правило трех сигм, характерное для нормального распределения. Его суть заключается в том, что нормально распределенные значения исследуемого показателя или свойства заключены в интервале $[-3\sigma; +3\sigma]$. Соответственно, все значения, выпадающие из этого интервала, считаются аномальными и не принадлежащими данному распределению.

Данное правило успешно применяется при выделении интервалов опасности и в случае логнормального, нормализованного и экспоненциального распределений. Это касается как прямых, так и обратных таковых распределений при максимумах встречаемости карстопроявлений в интервалах максимальных значений показателей строения карстового массива. Однако в этом случае ряд интервалов оказывается «выпадающим» за пределы границ изменения исследуемого показателя, что при этом критически не влияет на результаты дальнейшей оценки (рис. 5).

В практике отечественного карстологического районирования по степени устойчивости и карстоопасности к настоящему времени сложилась уже достаточно устойчивая база ранжирования территории. Строительными нормами [5] предложено выделять 6 категорий устойчивости по интенсивности провалооб-

разования и 4 категории устойчивости по диаметрам провалов. Некоторые территориальные строительные нормы [8] с учетом стадийности изысканий предлагают объединять данные категории устойчивости в 3 категории по степени карстоопасности: опасную, потенциально опасную и практически неопасную.

Выделение опасных интервалов с учетом правила «трех сигм» для всех используемых законов распределения ведется от среднего значения путем прибавления или вычитания от него значения среднеквадратического отклонения. В соответствии с вышеизложенным при оценке карстовой опасности предлагается выделять 3 категории, ограниченные с учетом следующих критериев (рис. 5):

- 1) опасная – $[(-\sigma) - (+\sigma)]$;
- 2) потенциально опасная – $[(-2\sigma) - (-\sigma)]$ и $[(+\sigma) - (+2\sigma)]$;
- 3) практически неопасная – $[(0) - (-2\sigma)]$ и $[(+2\sigma) - (+\infty)]$.

Каждый интервал карстовой опасности можно кодировать определенным символом или пользоваться балльной методикой оценки общей опасности по сумме всех исследуемых показателей активности карста на изучаемой территории. Преимуществом вероятностно-статистического подхода при выделении интервалов карстовой опасности является возможность перехода к вероятностной поинтервальной P оценке по анализируемому показателю. Ввиду адаптации эмпирических распределений всех анализируемых величин к теоретическим законам: нормальному, логнормальному, нормализованному и экспоненциальному – каждая из трех категорий карстоопасности характеризуется определенной вероятностью попадания в нее карстопроявления. Например, для семейства нормального закона эти вероятности следующие:

- 1) опасная – $P = 0.683$;
- 2) потенциально опасная – $P = 0.272$;
- 3) практически неопасная – $P = 0.043$.

Приведенная характеристика степеней опасности по вероятностному признаку корректируется с учетом данных о пространственном распределении карстовых форм по площадям интервалов исследуемых показателей строения массива. Корректировочной величиной выступает коэффициент корреляции r , устанавливающий линейную связь между площадями пространственной локализации классов-интервалов и количеством встреченных в их пределах форм карста:

$$P_r = P \cdot |r|. \quad (4)$$

Таким образом, вероятность отнесения исследуемого показателя в разрезе скважины к той или иной степени карстовой опасности занижается в тех случаях, когда связь между количеством карстопроявлений и площадями их локализации слабая или отсутствует вовсе.

Общая вероятность карстовой опасности P_{sum} определяется как произведение вероятных опасностей по каждому отдельному показателю $(P_r)_i$ с учетом распределения тех или иных карстовых форм:

$$P_{sum} = \prod_{i=1}^k (P_r)_i, \quad (5)$$

где k – количество частных вероятностных показателей карстовой опасности.

Приведенная оценка степени общей вероятной опасности при количестве частных показателей более 5–10 приводит к очень низким значениям, поэтому для удобства вводится новая величина λ – показатель карстовой опасности, определяемый по формуле:

$$\lambda = k + \lg P_{\text{sum}}. \quad (6)$$

Показатель карстовой опасности безразмерен, и его значения варьируют около нуля. Проведенные нами расчеты при различных количествах частных вероятностных показателей позволили сделать вывод о том, что все значения λ , меньшие нулевого, характерны для неопасных в отношении развития карста участков территорий, поэтому рекомендуется искусственно округлять все отрицательные значения до нуля. Участки, относящиеся к потенциально опасным, приурочены к значениям показателя λ , немногим превышающим 0, как правило, эти значения не превышают 1–2. Все остальные значения показателя карстовой опасности характерны для опасных участков исследуемой площади.

Эта установленная зависимость носит эмпирический характер и аналитического подтверждения пока не имеет. Основной задачей является переход к более эффективному и надежному показателю карстовой опасности, общему для всех ситуаций и не зависящему от количества исследуемых в выборке показателей строения территории. Тем не менее при количестве исследуемых показателей не превышающем 20, ранжирование территории по степени карстовой опасности рекомендуется проводить с учетом следующих соотношений:

- 1) практически неопасные территории $\lambda_i < \lambda_{\max} / 10$;
- 2) потенциально опасные территории $\lambda_{\max} / 10 \leq \lambda_i < \lambda_{\max} / 3$;
- 3) опасные территории $\lambda_i \geq \lambda_{\max} / 3$.

Достаточность и обоснованность выводов при прогнозной оценке карстовой опасности территории по показателю карстовой опасности λ зависит в первую очередь от изученности территории, а, следовательно, от числа используемых в расчетах характеристик состояния массива. Вполне весомые заключения о степени карстовой опасности с использованием данного критерия можно получить при количестве исследуемых параметров карстового массива от 5 и более.

4. Апробация предложенных методических подходов к процедуре оценки карстоопасности

Совокупный учет всех показателей строения территории позволяет получать обобщенную интегральную карту карстоопасности. Отдельный вопрос в данном случае возникает при выборе методики построения такого рода карты. Совершенно очевидно, что использование «сеточной» технологии, метода скользящего окна и им подобных решений в данном случае приводит к осреднению и, как следствие, огрублению, первоначальных результатов. Практически неприменимыми оказываются столь широко используемые в настоящее время методы группы кригинга. Данные методы хоть и имеют под собой вероятностно-статистическую основу, но при большом числе разнородных числовых данных в пределах ограниченных участков территорий приводят к неверному их истолкованию, которое выражается в «ломаном» виде конечных карт. Методы

обратно-взвешенного расстояния и интерполяции по сплайну по определению не подходят в конкретной ситуации. По этой причине при построении интегральных карт была избрана методика линейной интерполяции числовых значений показателя карстовой опасности или баллов опасности между соседними скважинами, близкая по смыслу к триангуляции и носящая название метода естественного соседства. Так как применяемый метод не исключает линейной интерполяции между весьма отдаленными объектами, то неизбежно встречаются ошибки, наиболее сильно выраженные в пределах проблемных участков, о которых сказано выше.

Отдельно следует отметить, что предлагаемая методика ориентирована в первую очередь на прогнозные построения и направлена на получение информации о карстовой опасности в пределах малоизученных в карстовом отношении участков лишь по распределениям карстовых форм по показателям строения территории. Построение максимально точных карт при этом уходит на второй план.

Опыт проведения анализа закарстованных толщ позволяет утверждать, что в качестве прогнозных показателей преимущественного развития поверхностных и подземных карстовых форм применима их большая часть из перечня, приведенного в табл. 1 [1, 2]. Малоинформативными или неинформативными являются те показатели, которые определены по сравнительно ограниченному числу первоначальных данных, недостаточному для построения адекватных карт их пространственного распространения в пределах изучаемой территории. Распределения карстопроявлений по таким показателям в большинстве своем являются «усеченными» и с большой долей погрешности отражают действительную картину.

Опасные интервалы значений прогнозных показателей, соответствующие разным степеням интенсивности развития карста в пределах территории г. Кунгур, выделены на основе экспертной оценки, а также с учетом теоретических распределений, описывающих их эмпирические аналоги. Применительно к территории г. Кунгур были проанализированы количественные данные о геологическом, гидрогеологическом, геоморфологическом, структурно-тектоническом строении, а также показатели водно-физических свойств покровных четвертичных отложений [19]. При построении карт были учтены распределения всех карстовых форм, как поверхностных, так и подземных, по выделенным показателям строения территории города.

Интегральная карта карстоопасности территории г. Кунгур, построенная с применением экспертного подхода и балльного принципа оценки, приведена на рис. 6. На рис. 7 показана карта карстоопасности, построенная по вероятностно-статистическому показателю опасности λ . На последней карте вынесены линии, по которым построены «карстологические» разрезы (рис. 8, 9). Данные разрезы отражают особенности геолого-гидрогеологического строения исследуемой толщи массива пород. Кроме того, в виде цветовой схемы и подписи на них вынесены характерные карстовые опасности, определенные двумя выше описанными методами.

Как показали результаты предварительных построений в пределах хорошо изученных участков территории г. Кунгур, прогнозные карты достаточно точно

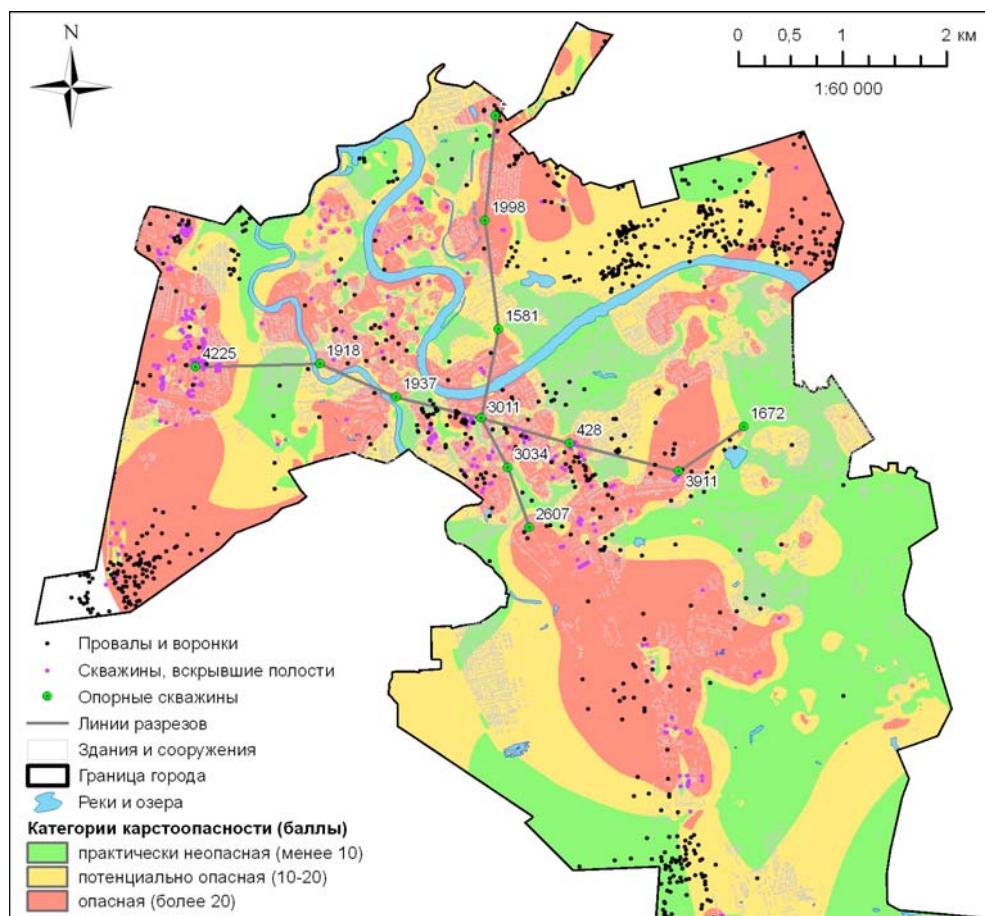


Рис. 6. Интегральная карта карстоопасности территории г. Кунгур, построенная с применением экспериментального подхода по результатам балльной оценки

отражают характер карстоопасности. За редким исключением прогнозные модели карстовой опасности неверно трактуют действительную обстановку. Это связано с проблемным характером изначальных распределений показателей строения природной среды, по анализу которых делается вывод относительно реальной карстоопасности.

Предварительное визуальное качественно-оценочное сравнение интегральных карт карстоопасности с ранее построенными картами устойчивости [20–22] не обнаруживает сколько-нибудь серьезных расхождений. Наиболее опасные участки, выделенные при районировании в обоих случаях, приурочены к тем же территориям.

На территории г. Кунгур в 2008 г. было произведено заверочное бурение двух карстологических скважин по 30 м каждая с целью проверки адекватности полученных моделей карстоопасности. Данные скважины бурились в пределах участков, характеризующихся I и II категориями устойчивости [22], а на настоящих прогнозных картах карстоопасности они приурочены к опасным и потенциально опасным площадям (рис. 10). В результате бурения скважина № 1 вскрыла две карстовые полости, в скважине № 2 полостей обнаружено не было.

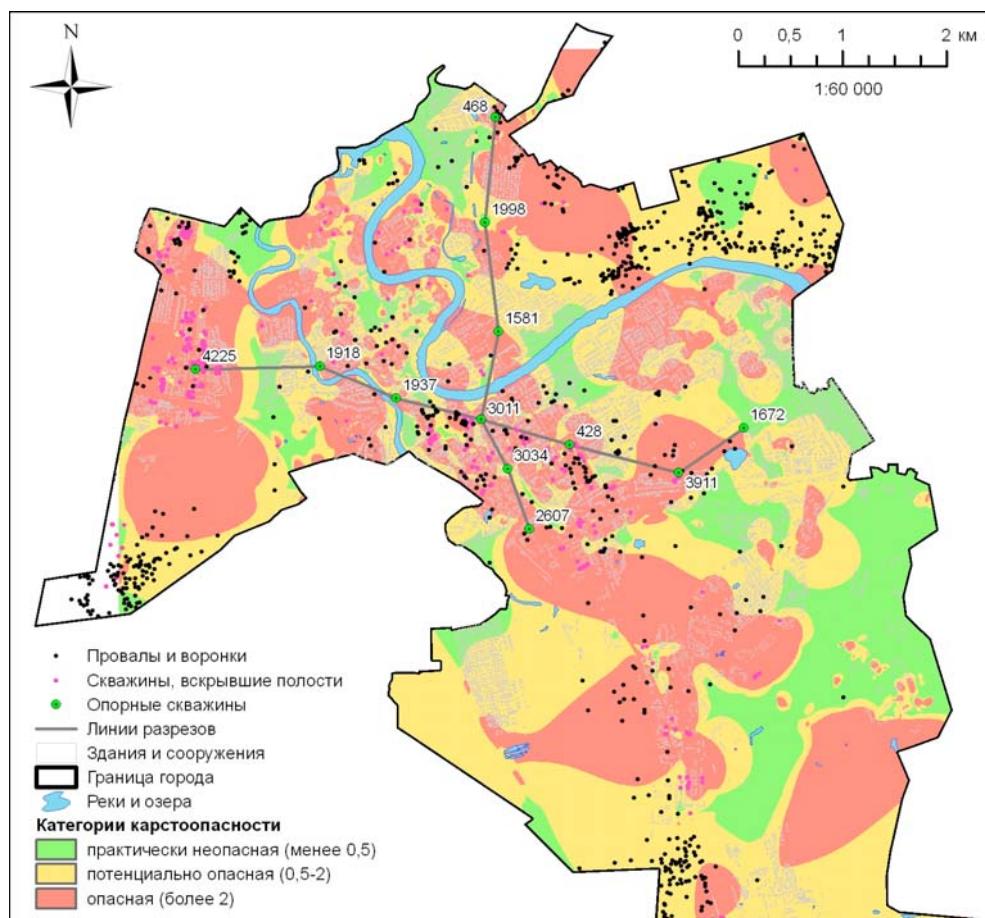


Рис. 7. Интегральная карта карстоопасности территории г. Кунгур, построенная с использованием вероятностно-статистического показателя опасности λ

Анализ геолого-гидрогеологического разреза скважин показал, что в пределах опасного диапазона варьируют 4 показателя (мощность четвертичных, мощность неоген-четвертичных отложений, а также альтитуда кровли иренских гипсов и ангидритов), а один показатель (уровень грунтовых вод) приурочен к потенциально опасному интервалу. Таким образом, лишь на основе анализа только этих показателей строения можно заключить, что данные скважины расположены в карстоопасной зоне, а построенные карстологические модели с достаточной точностью это отражают.

Результаты исследования морфометрических параметров карстовых форм по опасным интервалам на построенных картографических моделях карстоопасности приведены в табл. 2. Отдельно были рассмотрены поверхностные и подземные карстопроявления. Поверхностные карстовые формы по времени их образования или возрасту условно разделены на провалы и воронки: к провалам относятся карстовые образования, возраст которых известен, воронки же не характеризуются точной временной привязкой и условно относятся к древним провалам. Анализируя данные табл. 2, можно заключить, что в пределах наиболее опасных интервалов локализовано большее в количественном отношении число

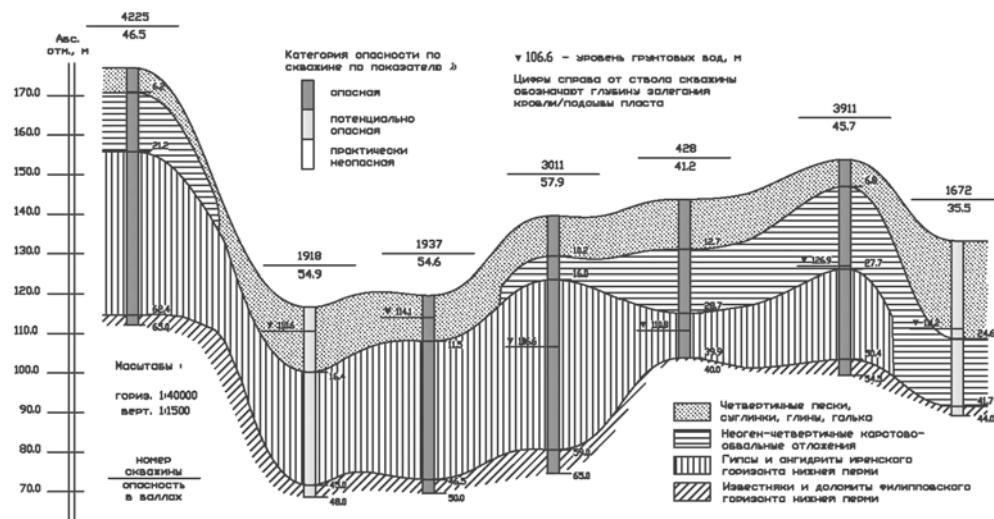


Рис. 8. Карстологический разрез по линии «СКВ. 4225 – СКВ. 1672»

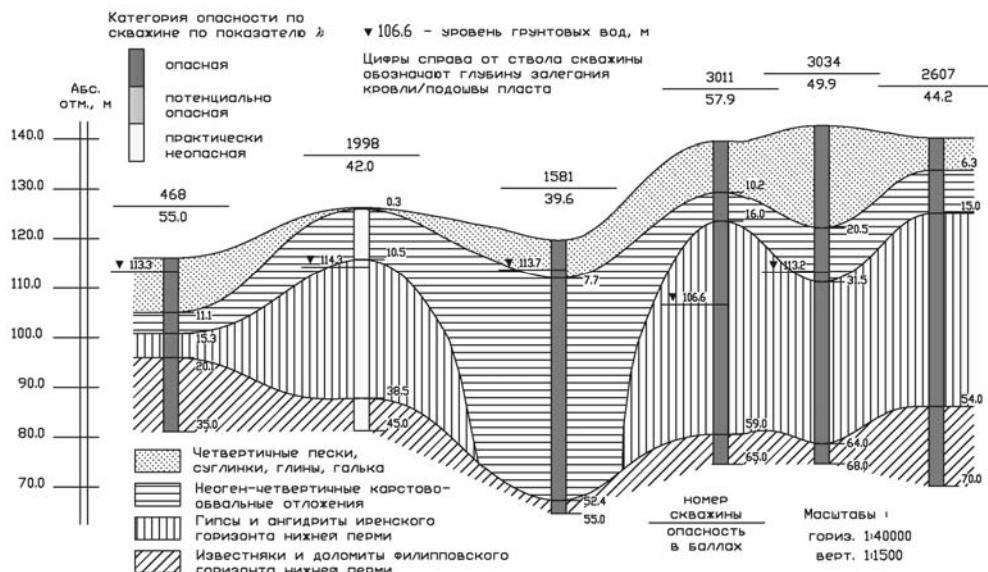


Рис. 9. Карстологический разрез по линии «СКВ. 468 – СКВ. 2607»

карстопроявлений. В то же время их морфометрические характеристики не всегда подчиняются такой же зависимости. Зачастую максимальные средние диаметры поверхностных карстовых форм и наиболее крупные по вертикальному размеру полости относятся к потенциально опасным категориям, а в некоторых случаях и к практически неопасным. Это, по-видимому, объясняется особенностями строения и свойствами закарстованных пород и перекрывающих их отложений. В пределах участков, относящихся к опасной категории, массив часто характеризуется нарушенным состоянием пород, их повышенной трещиноватостью и раздробленностью, что способствует развитию многочисленных подземных

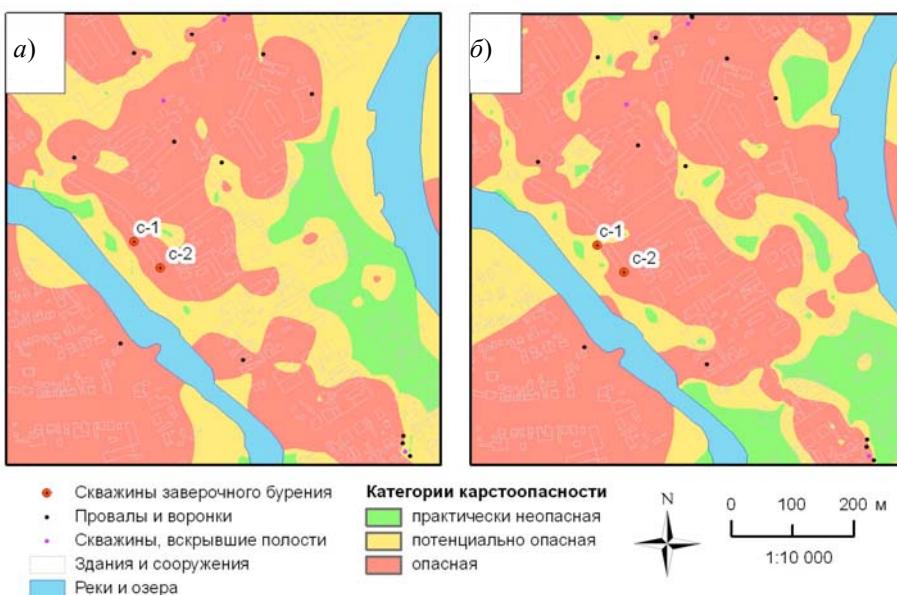


Рис. 10. Расположение скважин заверочного бурения: а) на карте построенной методом экспертной оценки; б) на карте построенной по показателю карстовой опасности λ

карстовых пустот и вместе с тем широкому проявлению провалов на поверхности, причем плотность распространения их достаточно высока (более 10 шт./ км^2). Практически неопасные в карстовом отношении площади, наоборот, сложены более плотными и крепкими породами, где преобладают целиковые зоны с преобладающим развитием зон повышенной трещиноватости по их периферии, которые контролируются структурно-тектоническими особенностями строения массива. Здесь возможно образование объемных подземных пустот и, как следствие, весьма крупных провальных форм карста на поверхности.

Заключение

Результаты проведенного анализа современных методов оценки устойчивости закарстованных территорий, особенно в пределах градопромышленных агломераций, позволяют предполагать, что разработанная на данный момент методологическая база оценки устойчивости и карстоопасности территории является наиболее часто используемой в инженерно-геологической практике, но не универсальной. Используемые методы оценки напрямую не учитывают особенности строения массива горных пород, в пределах которого активно протекает карстовый процесс. Анализ массива, базирующийся на его всестороннем изучении с применением математического аппарата, позволяет получать целостную картину действующей опасности карста на исследуемой площади. Учитывая тот факт, что все используемые методы цифрового моделирования, основанные на применении методов математической статистики, имеют известные ограничения, очевидно, что дифференцированный подход к выбору показателей строения массива и определению комплекса методов их учета при прогнозных карстологических построениях расширяет возможности исследователя в получении и объективной интерпретации конечных результатов.

Табл. 2. Параметры карстовых форм в пределах участков различной категории опасности

Категория карстоопасности	Площадь интервала опасности, км ²	Общее кол-во карстовых форм, шт.	Параметрические показатели карстовых форм*						Полости		
			Прорвы			Воронки			кол-во, шт.	площадь, м	высота, м
1. Карта карстоопасности, построенная по данным экспертной оценки с применением балльной метода											
Опасная	2.89	844	182	<u>0.2-21.0</u>	<u>0.2-7.0</u>	<u>0.1-346.2</u>	<u>1.7</u>	<u>16.4</u>	<u>4.5-35.7</u>	<u>16.1-1000.0</u>	<u>491</u>
Потенциально опасная	3.37	283	206	<u>0.1-18.0</u>	<u>0.2-7.0</u>	<u>0.1-254.3</u>	<u>1.3</u>	<u>10.2</u>	<u>69</u>	<u>3.8-35.7</u>	<u>11.5-1000.0</u>
Практически неопасная	4.59	213	61	<u>0.2-20.0</u>	<u>0.1-13.0</u>	<u>0.1-314.0</u>	<u>3.0</u>	<u>1.9</u>	<u>144</u>	<u>4.74-35.7</u>	<u>17.6-1000.0</u>
2. Карта карстоопасности, построенная методом вероятно-статистической оценки через расчет показателя карстовой опасности λ											
Опасная	2.29	765	224	<u>0.2-21.0</u>	<u>0.2-6.0</u>	<u>0.1-346.2</u>	<u>1.4</u>	<u>10.0</u>	<u>90</u>	<u>3.8-35.7</u>	<u>11.5-1000.0</u>
Потенциально опасная	3.39	434	161	<u>0.1-18.0</u>	<u>0.1-13.0</u>	<u>0.1-254.3</u>	<u>2.7</u>	<u>1.5</u>	<u>246</u>	<u>4.5-35.7</u>	<u>16.1-1000.0</u>
Практически неопасная	2.35	101	58	<u>0.2-20.0</u>	<u>0.2-7.0</u>	<u>0.1-314.0</u>	<u>3.3</u>	<u>1.7</u>	<u>26</u>	<u>5.2-26.1</u>	<u>21.4-534.0</u>

* В числителе дроби приведены минимальные и максимальные значения параметра, в знаменателе – средние значения.

Рассматриваемые в настоящей работе методы интегральной оценки карстоопасности не отражают объективной картины состояний урбанизированных территорий. Они предлагают лишь некий тренд, общий путь направления исследований и дальнейших разработок, которые целесообразно развивать в инженерном карстоведении в целях получения результатов максимально приближенных к реальной геологической действительности, особенно при выполнении прогнозных карстологических построений. Результаты прогнозных построений и выявленные закономерности распределения карстовых форм в пределах исследуемого массива позволяют осуществлять предварительные оценки карстоопасности на малоизученных участках, обладающих схожими параметрическими характеристиками строения территории и формулировать обоснованные рекомендации безопасного инженерного освоения закарстованных городских и градопромышленных территорий.

Summary

S.V. Scherbakov, V.N. Kataev. Integral Estimation of Karst Hazard in Urbanized Territories (On the Example of Kungur City).

The article presents a procedure of integral estimation of karst hazard in urbanized territories based on the simultaneous account of a set of characteristics of a karst massif structure. Mathematical tools and probability statistical analysis methods used for karst hazard estimation were founded. Using the proposed methods the maps of karst hazard on the territory of Kungur city maximally taking into account the whole set of input data were developed. Estimation accuracy during the construction of the maps was verified based on boreholes check drilling and investigation of karst forms distribution and their morphometric parameters according to certain categories of hazard.

Key words: karst, karst hazard, characteristics of territory structure, distribution of karst forms.

Литература

1. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М., Ковалева Т.Г. Особенности геологического строения территории и пространственное распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгур) // Вестн. Перм. ун-та. Геология.– 2009. – Вып. 3. – С. 77–93.
2. Катаев В.Н., Лихая О.М., Ковалева Т.Г., Золотарев Д.Р., Щербаков С.В. Особенности химического состава вод иренского водоносного горизонта и карстопроявления (на примере территории г. Кунгур) // Вестн. Перм. ун-та. Геология. – 2009. – Вып. 3. – С. 66–76.
3. Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Щербаков С.В. Роль структурно-тектонических особенностей территории в развитии карстовых процессов // ИнтерКарто/ИнтерГИС 15: устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы Междунар. конф. – Пермь, Гент, 2009. – С. 458–462.
4. Природные опасности России: в 6 т. Т. 3. Эзогенные геологические опасности / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. – М.: Изд. фирма «КРУК», 2002. – 345 с.

5. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических инженерно-геологических процессов. – М.: ПНИИИС, 2001. – 101 с.
6. ТСН 302-50-95 РБ. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях. – Уфа: Госстрой Респ. Башкортостан, 1996. – 44 с.
7. ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. – Н. Новгород, 1999. – 72 с.
8. ТСН 11-301-2004 По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях Пермской области. – Пермь, 2004. – 122 с.
9. ТСН 31-11-2005 Пк. Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Пермского края. – Пермь, 2005. – 46 с.
10. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. НИИОСП Госстроя СССР. – М., 1985. – 78 с.
11. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. ПНИИИС. – М., 1995. – 165 с.
12. Катаев В.Н. Методология и практика сравнительно-оценочного карстологического районирования. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2001. – 85 с.
13. Катаев В.Н. Геологическое строение и типы дислокаций пещерного массива // Кунгурская ледяная пещера. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 1995. – Вып. 1. – С. 8–26.
14. Катаев В.Н., Аксарин В.В. Линеаментный анализ территории г. Кунгура в целях карстологического прогноза // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч.-практ. конф. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2007. – С. 202–205.
15. Дублянский В.Н., Кадебская О.И., Лавров И.А., Лаврова Н.В., Пятунин М.С., Кадебский Ю.В., Никифорова И.А., Худенъких К.О., Дублянская Г.Н., Катаев В.Н., Молоштанова Н.Е., Паньков Н.Н., Шувалов В.М., Максимович Н.Г., Назарова У.В., Мавлюдов Б.Р. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под ред. В.Н. Дублянского. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 376 с.
16. Верзаков М.С. Опыт использования методов математической статистики для оценки вероятных размеров карстовых провалов // Вопр. карстоведения. – Пермь, 1969. – С. 128–132.
17. Толмачев В.В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. – М.: Недра, 1990. – 150 с.
18. Катаев В.Н., Челпанова Т.А. Характер плотностного распределения трещин в пласте осадочных горных пород // Вестн. Перм. ун-та. Геология. – 1999. – Вып. 3. – С. 194–206.
19. Щербаков С.В. Физические свойства четвертичных дисперсных отложений и их влияние на активность карста // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч.-практ. конф. – Пермь, 2010. – С. 265–268.
20. Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М., Кошкина Д.В. Еще раз о методике оценки карстоопасности закарстованных территорий (на примере г. Кунгур) // Проблемы инженерной геологии карста урбанизированных территорий и водохранилищ. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. – С. 306–312.
21. Щербаков С.В., Золотарев Д.Р. Прогнозирование устойчивости закарстованных территорий (на примере г. Кунгур) // Конф. студентов, аспирантов и молодых ученых геол. фак. Перм. гос. ун-та: Материалы конф. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. – С. 164–168.

22. Дублянская Г.Н., Ковалева Т.Г., Лихая О.М., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Кошкина Д.В. Оценка карстоопасности и устойчивости закарстованных урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Сергеевские чтения. – М.: ГЕОС, 2008. – Вып. 10. – С. 129–134.

Поступила в редакцию
09.09.10

Щербаков Сергей Владимирович – аспирант, инженер научно-исследовательской части Пермского государственного университета.

E-mail: greyvr@mail.ru

Катаев Валерий Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, начальник научно-исследовательской части Пермского государственного университета.

E-mail: kataev@psu.ru