

На правах рукописи



Щербаков Сергей Владимирович

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
КАРСТООПАСНОСТИ РАЙОНОВ
РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНО-
СУЛЬФАТНОГО КАРСТА НА ПРИМЕРЕ
СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета

Научный руководитель:

Катаев Валерий Николаевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор.
Проректор по научной работе и инновациям
ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет».

Официальные оппоненты:

Хоменко Виктор Петрович,

доктор геолого-минералогических наук, профессор.
Профессор кафедры инженерной геологии и
геоэкологии ФГБОУ ВПО «Московский
государственный строительный университет».

Абдрахманов Рафил Фазылович,

доктор геолого-минералогических наук, профессор.
Заведующий лабораторией гидрогеологии и
геоэкологии Института геологии УНЦ РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Горный институт Уральского
отделения Российской академии наук».

Защита состоится «30» сентября 2013 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.280.04, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», по адресу 620000, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, в аудитории 3336.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного горного университета.

Автореферат разослан «28» августа 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.280.04 доктор геолого-
минералогических наук, доцент



И.В. Абатурова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Значительная часть территории Российской Федерации характеризуется распространением карстующихся пород. Активно развивающийся карстовый процесс, а как следствие и формы его проявления широко развиты в Пермском крае, Нижегородской области, республиках Башкортостан и Татарстан и в той или иной мере представлены в других регионах страны. Присутствие в геологическом разрезе карстующихся пород обуславливает дополнительные проблемы при хозяйственном освоении территорий, особенно при выборе мест под застройку, а также в значительной степени усложняет условия строительства и эксплуатации хозяйственных объектов. Важной задачей при этом является оценка степени карстовой опасности в пределах осваиваемых территориальных объектов.

К настоящему времени 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. Несмотря на это, по-прежнему не разработана универсальная методика оценки карстовой опасности, которая наиболее эффективно и на количественном уровне учитывала бы особенности строения изучаемой территории. В данном случае комплексный учет подразумевает построение карстологической модели, отражающей особенности различных аспектов природного строения (структурно-тектонических, геоморфологических, геолого-гидрогеологических, инженерно-геологических) территории и их влияние на развитие карста и степень опасности его проявления.

Главная научная идея работы заключается в установлении концептуальных количественных взаимосвязей между природными условиями развития карста, формализованными в виде набора отдельных показателей-факторов, интенсивностью и масштабами проявления карстовых форм.

Целью работы является разработка универсальной методологии интегральной оценки карстоопасности, на основе выявления закономерных связей пространственного распределения форм карста, их параметров и показателей особенностей строения массивов карстующихся горных пород.

Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие **задачи**:

- сбор и анализ опубликованной и нормативной литературы, а также фондовых материалов по оценке карстоопасности и устойчивости территорий;
- сбор, анализ и систематизация отчетных материалов исследований прошлых лет и составление специализированных баз данных, включающих сведения о структурно-тектоническом и геологическом строении исследуемых территорий, гидрогеологических, геоморфологических, инженерно-геологических условиях и карстопроявлениях в их пределах;
- обоснование и выделение комплекса значимых показателей-факторов природного строения карстовых массивов и построение тематических карт, отражающих изменчивость показателей в пределах исследуемых геологических объектов;
- поиск взаимосвязей между значениями исследуемых показателей, характеризующих природные условия в конкретных частях массива, и пространственным распределением поверхностных и подземных форм карста в данных условиях;
- разработка методологии интегральной оценки карстоопасности, базирующейся на изучении распределения карстовых форм и установлении зависимости их основных морфометрических параметров от значений рассматриваемых показателей природного строения карстовых массивов;

- формулирование и обоснование основных принципов построения комплексной модели карстоопасности и итоговых интегральных величин, характеризующих степень опасности проявления карста;

- апробация предложенного интегрального подхода к оценке карстоопасности на примере интенсивно закарстованных территорий Пермского Предуралья, сравнение итоговых интегральных моделей с результатами оценочных построений, осуществленных с применением нормативного подхода к оценке устойчивости закарстованных территорий.

Методологической и теоретической основой диссертации послужили материалы и опубликованные работы признанных отечественных и зарубежных исследователей в области инженерного карстования. В основу интегральной методологии в первую очередь были положены труды Г.А. Максимовича, посвященные гидрогеологии карстовых массивов, проблеме оценке устойчивости закарстованных территорий; В.В. Толмачева и И.А. Саваренского, посвященные вероятностно-статистической оценке карста; В.П. Костарева, отражающие особенности распределения морфометрических характеристик карстовых форм и их пространственно-временного развития в пределах осваиваемых территорий; В.Н. и Г.Н. Дублянских о роли основных условий и факторов развития карста при оценке опасности его проявления; В.П. Хоменко, посвященные моделированию карстово-суффозионных процессов; И.А. Печеркина по изучению активности развития и прогнозированию карстовых процессов в прибрежных зонах водохранилищ; В.М. Кутепова о применимости детерминистических математических моделей при прогнозировании морфометрических параметров карстовых форм. В диссертации учтены отдельные положения работ В.С. Лукина, В.Н. Андрейчука, В.И. Мартина, Б.Н. Иванова, К.А. Горбуновой, Г. Адерхолд, P.W. Williams, A.H. Cooper, J.P. Galve и F. Gutierrez, а также материалы различных исследователей в области карста, опубликованные в сборниках материалов конференций по проблемам провалов под общей редакцией В.Ф. Веck (Флорида, США).

Объектами исследования явились массивы горных пород, сложенные в коренной части закарстованными сульфатными и карбонатно-сульфатными отложениями восточной окраины Восточно-Европейской платформы в пределах Среднего Предуралья.

Предметом исследования являются многофакторные зависимости между элементами геолого-гидрогеологического строения карстового массива, охарактеризованными количественно, и показателями, характеризующими интенсивность карстопроявлений и их морфометрию.

Научная новизна результатов работы определяется тем, что в ходе проведенных исследований:

- получены новые и подтверждены ранее известные зависимости между численными параметрами природного строения карстующихся массивов, морфометрическими параметрами подземных и поверхностных форм карста и интенсивностью их проявления;

- обоснован выбор наиболее значимых для оценки карстоопасности факторов строения геологической среды, их обобщение в группы и иерархическая соподчиненность;

- сформулированы основные методологические принципы оценки карстоопасности на современном этапе, обусловленные количественным анализом взаимосвязей элементов природного строения карстовых массивов и форм проявления карстового процесса;

- усовершенствованы существующие численные методы оценки карстоопасности, применяемые в отечественной и зарубежной практике инженерного карстования.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

- разработана и адаптирована к конкретным условиям развития карбонатно-сульфатного карста методология интегральной оценки карстоопасности, основанная на установлении математических зависимостей между показателями природного строения, интенсивностью и морфометрическими параметрами карстопроявлений;

- определены условия применения интегрального подхода к оценке карстоопасности в практике карстологических и инженерно-геологических исследований и изысканий;
- созданы интегральные картографические модели карстоопасности для территорий активного развития сульфатного и сульфатно-карбонатного карста Пермского края;
- проведен сравнительный анализ эффективности применения интегрального подхода к оценке карстоопасности и методов оценки, закрепленных в нормативной документации.

Предложенный подход может быть использован в качестве альтернативы существующих нормативно закрепленных методик при прогнозировании карстоопасности и устойчивости территорий в ходе проведения инженерных изысканий на закарстованных территориях. Преимуществами интегрального подхода являются повышенная точность прогноза, относительная простота его осуществления, прогнозирование вероятности образования и морфометрических параметров как поверхностных, так и подземных карстовых форм, а также возможность оценки карстоопасности в пределах малоизученных в карстологическом отношении или труднодоступных районов для непосредственного исследования и картирования поверхностных карстовых форм.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе в рамках дисциплин «Общее карстоведение» и «Инженерное карстоведение», читаемых на геологическом факультете Пермского государственного национального исследовательского университета.

Предметом защиты являются следующие положения:

1. Комплекс количественных показателей строения карстовых массивов является основой оценки опасности проявления карста.
2. Морфометрические параметры прогнозируемых поверхностных и подземных карстовых форм устанавливаются по морфометрическим данным закартированных форм, развитых на участках массивов с идентичным геолого-гидрогеологическим строением.
3. Взаимосвязи между количеством и морфометрическими параметрами карстовых форм, с одной стороны, и особенностями природного строения массива горных пород – с другой, описываются нормальным и логнормальным законами распределения и отражаются конкретными математическими зависимостями.
4. Метод интегрального учета установленных взаимосвязей между показателями строения закарстованных массивов и карстовыми формами позволяет оценивать вероятности образования и морфометрические параметры карстовых форм, а также повышает эффективность карстологического прогноза.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается углубленным анализом состояния решаемой проблемы; применением обоснованного комплекса методов исследований и теории, основанной на общеизвестных и общепринятых зависимостях; разнообразием районов исследования, расположенных в различных природных обстановках развития карста; хорошей сравнимостью результатов оценки с применением разработанной интегральной методики с результатами оценочных построений, существенных нормативным способом.

Исходные материалы, использованные в работе. Исследования, положенные в основу диссертации, проводились в рамках ряда общенаучных, государственных и отраслевых программ, в выполнении которых автор принимал непосредственное участие. В работе использованы данные, в разное время предоставленные рядом научно-производственных и изыскательских организаций: Кунгурской лабораторией стационаром при Горном институте УрО РАН, ОАО «ВерхнеКамГИСИЗ» (Пермь), ОАО «Пермгипроводхоз» (Пермь), ООО «Карбон» (Ижевск), филиалом ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Пермнипнефть», а также материалы экспедиционных геолого-гидрогеологических, инженерно-геологических и карстологических исследований кафедр динамической геологии и гидрогеологии, инженерной геологии и охраны недр Пермского

государственного национального исследовательского университета и Естественнонаучного института при университете.

Всего в анализе участвовало 5336 горных выработок различной глубинности, 1376 опробований подземных и поверхностных вод, 6730 проб грунтов. В карстологическом отношении в пределах исследуемых районов закартировано 3384 карстовых воронок, 1047 полостей и 1097 зон дробления.

Личный вклад автора в получении научных результатов, изложенных в диссертационной работе, выражается в непосредственном участии в период с 2005 по 2012 гг. в полевых и камеральных работах в качестве лаборанта, а позже инженера научно-исследовательской части Пермского государственного национального исследовательского университета. Все материалы исследований, положенные в основу диссертации, обработаны автором лично. Все результаты получены им самостоятельно. Материалы, представленные в данной работе без библиографических ссылок, принадлежат автору.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 32 работы, 3 из которых в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, включающих 10 разделов и 16 подразделов, заключения, списка литературных источников, содержащего 273 наименования. Общий объем диссертации – 273 страницы, включая 91 рисунок и 49 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю, заведующему кафедрой гидрогеологии и динамической геологии Пермского государственного национального исследовательского университета, профессору В.Н. Катаеву за ценные советы и помощь, оказанную при написании диссертационной работы. Отдельно хочется поблагодарить профессора Г.Н. Дублянскую. Наконец, особую благодарность автор выражает своим коллегам и друзьям Д.Р. Золотареву, Т.Г. Ковалевой, О.М. Лихой, С.А. Пентеговой, Ю.А. Ардавичус и А.В. Шиловой, в разное время принимавших участие в совместной работе над общими проектами и оказавших помощь в процессе сбора и анализа материалов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ мирового опыта и подходов к оценке карстоопасности

Глава состоит из 3 разделов и 10 подразделов и посвящена рассмотрению методик и подходов, применяемых в разное время разными авторами в целях оценки карстоопасности территорий. Изложение ранее предлагавшихся подходов в данной главе носит описательный характер без их критического осмысления. Основной задачей обзора является рассмотрение принципиальных показателей, характеризующих закарстованность территории, а также методик оценки карстоопасности с целью выявления и последующего обоснования их общих недостатков и формулировки рекомендаций по разработке универсального подхода к осуществлению оценочных построений карстоопасности.

Анализ опыта оценки карстоопасности проведен в свете следующих **трех направлений оценки:**

- 1) по поверхностным и подземным карстовым формам (подземной и поверхностной закарстованности);
- 2) по отдельным факторам природных условий;
- 3) по совокупности факторов природных условий и закарстованности (интегральный подход).

Оценки, получаемые в рамках **первого направления**, сводятся к количественному анализу морфометрии и пространственно-временного развития карстовых форм, а также общей закарстованности массива в отрыве от внешних условий среды протекания карстового процесса. В современном карстоведении известно более 150 количественных

показателей, характеризующих особенности развития карстовых форм и их морфометрические параметры.

Изучение влияния отдельных факторов природных условий на активность и опасность протекания карста (**второе направление**), как правило, сводится к качественной характеристике направленности и интенсивности процесса в зависимости от конкретных условий. С инженерной точки зрения наибольший интерес представляет исследование группы локальных факторов, действие которых оказывает непосредственное влияние на устойчивость системы «карст-сооружение». В настоящем обзоре вся совокупность наиболее часто применяемых в инженерно-карстологической практике факторов природных условий при исследовании карстовых массивов разделена на 5 групп, характеризующих природные условия с позиции структурно-тектонического и геологического строения, гидрогеологических, геоморфологических и инженерно-геологических условий.

При изучении структурно-тектонического строения территории с позиции опасности проявления карста наиболее часто исследуются особенности формирования карстового рельефа, контролируемые сетью разрывных нарушений и неотектоническим режимом. Прогностическими показателями карстоопасности при этом выступают амплитуда перемещения центральных частей локальных тектонических структур и углы наклона их крыльев, линейная плотность и количество пересечений тектонических трещин, тектоническая блочность и удаленность от разломов и т.д.

Связь закарстованности с особенностями геологического строения и геологической историей района является одной из основных предпосылок опасности развития карста. Основными факторами, обуславливающими распространение и морфогенез карста, являются: вещественный состав растворимой породы; ее текстурно-структурные особенности; содержание и состав нерастворимого остатка; состав, строение, мощность, генезис и возраст пород карстующейся и покровных толщ.

В гидрогеологическом отношении интенсивность закарстованности и соответственно опасность развития карста, зональность его проявления обуславливаются особенностями дренирования подземных вод и их гидрохимическим составом. Количественными индикаторами карстоопасности служат такие показатели гидрогеологического режима, как инфильтрация дождевых и поверхностных вод, коэффициент фильтрации грунтов, уровни грунтовых и трещинно-карстовых вод, их минерализация и др.

Геоморфологические условия оказывают существенное влияние на развитие и распределение карста. Характер опасности проявления процесса постепенно снижается при удалении от рек в глубь водораздела. Немаловажное значение имеет расчлененность рельефа и его общая крутизна. Количественными показателями геоморфологических условий часто выступают: удаленность от речных русел U ; уклон рельефа β ; горизонтальная расчлененность рельефа (эрозионный врез) ER ; превышение над уровнем рек ΔH .

Рассмотрение карстового массива с позиции инженерно-геологических условий заключается в изучении состава, состояния, структурно-текстурных особенностей отложений перекрывающей толщи и растворимых пород, а также их физико-механических свойств.

К **третьему направлению** оценки карстоопасности относятся *комплексные* или *интегральные методики*. Интегральные оценки карстоопасности устанавливаются в результате комплексного исследования двух составляющих – природных условий развития карста, выраженных в форме конкретного набора факторов, и характера закарстованности, оцениваемого по показателям развития и морфометрии карстопоявлений. В зависимости от способа комплексирования факторов природных условий и показателей закарстованности можно выделить следующие три типа интегральных оценок: *качественные, полуколичественные и количественные*.

В инженерном карстоведении качественные подходы являются преобладающими методами интегральной оценки карстоопасности. Они сводятся к районированию территории по качественным признакам, которое заключается в выделении в пределах ее границ участков, характеризующихся однородностью природных условий. В пределах таких участков карст характеризуется определенной активностью, на основании чего делаются заключения о степени опасности его проявления.

Полукваликативные интегральные оценки карстоопасности осуществляются балльным методом в результате комплексования различных факторов природно-техногенных условий и их совместного рассмотрения в совокупности с показателями закарстованности.

Количественные интегральные оценки позволяют учитывать влияние исследуемого набора факторов природного строения на опасность карста посредством расчета интегрального показателя опасности с привлечением вероятностно-статистических методов. Интегральный показатель опасности в данном случае может быть выражен в вероятностной форме, в форме некоторой безразмерной величины, а в некоторых случаях иметь конкретную размерность и выражаться, например, в форме среднего диаметра провала или интенсивности провалообразования и т.д.

Глава 2. Исследуемые территории

Во второй главе рассматриваются пилотные территории проведения анализа, обосновывается их выбор. Пилотными в данном исследовании послужили закарстованные массивы горных пород, развитые в пределах Пермского края, – это территория г. Кунгура, территория пгт Полазна, территория энергокоридора трансрегионального газопровода высокого давления «Ямбург-Елец» на участке Красноясыльского полигона (близ пос. Красный Ясыл Ординского района), территории пос. Октябрьский (рисунок 1).



Рисунок 1. Пермский край: схема расположения исследуемых территорий

В карстологическом отношении изученные массивы расположены в пределах Полазенского, Нижнесьвинского, Иренского районов, а также района Уфимского плато Пермского края. Здесь развивается преимущественно сульфатный и карбонатно-сульфатный карст.

В геологическом строении приповерхностной части осадочного чехла исследуемых территорий принимают участие породы пермской, неоген-четвертичной и четвертичной систем (рисунок 2). Карстующимися являются отложения кунгурского яруса пермской системы P_{1kg} , представленные двумя горизонтами – иренским P_{1ir} (гипсы, ангидриты, реже известняки и доломиты) и филипповским P_{1ph} (доломиты и известняки).

Пермские породы практически повсеместно перекрыты толщей обвально-карстовых отложений неоген-четвертичного возраста $N-Q$ (глинистые грунты с крупнообломочным заполнителем) и четвертичными отложениями Q , представленные дисперсными грунтами различного происхождения и состава (пески, супеси, суглинки, глины, гравийно-галечниковые грунты). На некоторых участках, развитых небольшими ореолами, пермские карстующиеся отложения перекрыты породами уфимского яруса нижней перми P_{1uf} (мергели, песчаники, глины, аргиллиты), часто залегающими в нарушенном состоянии и зачастую отождествляемыми с обвально-карстовой толщей.

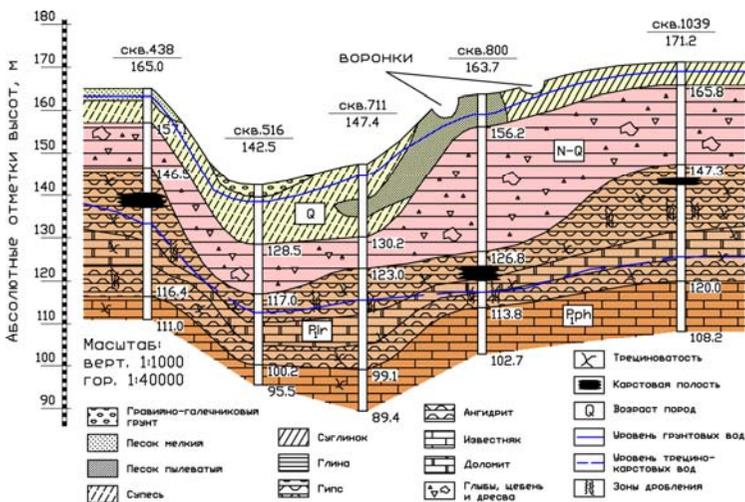


Рисунок 2. Наиболее типичный геологический разрез в пределах исследуемых территорий (на примере г. Кунгура)

В гидрогеологическом отношении в пределах исследуемых территорий выделяют два постоянных водоносных горизонта – грунтовых и трещинно-карстовых вод (см. рисунок 2).

Глава 3. Методика интегральной оценки карстоопасности

Третья глава включает 5 разделов и 6 подразделов и посвящена критическому анализу сильных и слабых сторон существующих подходов к оценке карстоопасности. В результате сформулированы основополагающие принципы и выделено магистральное направление дальнейших исследований в области оценки опасности проявления карста. С учетом отмеченных моментов разработана альтернативная методика, позволяющая в интегральной форме устанавливать характер карстоопасности в результате исследования природных условий развития карста.

Изучение опыта оценки карстоопасности, систематизированного с позиции отдельных показателей закарстованности, с одной стороны, и природных условий развития карста – с другой, а также их совместного комплексного анализа (интегральный подход) позволило сформулировать целостное видение рассматриваемой проблемы. Очевидно, что наиболее полными по содержанию являются интегральные методики оценки карстоопасности, направленные на всестороннее изучение карстового процесса в рамках исследуемой части массива. Однако существующие на данный момент интегральные подходы к оценке карстоопасности обладают общими недостатками, наиболее значимыми из которых являются: 1) акцентирование внимания на рассмотрении поверхностных форм карста; 2) субъективное выделение комплекса исследуемых факторов развития карста, зачастую не в полной мере отвечающих природе карстового процесса; 3) совместное рассмотрение как качественных, так и количественных показателей; 4) высокая субъективность при осуществлении качественных оценок; 5) субъективное выделение интервалов значений количественных и категорий качественных показателей природных условий, характеризующихся различной степенью опасности; 6) не всегда обоснованное назначение весовых коэффициентов, учитывающих вклад отдельных факторов в общую интегральную

модель; 7) неоднозначность трактовки итоговых балльных и количественных вероятностно-статистических интегральных показателей в отношении опасности проявления карста; 8) отсутствие вероятностно-статистических разработок, направленных на прогнозирование морфометрических параметров карстовых форм в зависимости от значений показателей природных условий; 9) относительная сложность реализации большинства оценочных построений на различных стадиях анализа; 10) объектная ориентация практически всех методик применительно к условиям конкретной исследуемой территории; 11) невысокая прогностическая способность, в значительной степени свойственная полуколичественным и количественным методикам оценки.

Рассмотренные пункты позволяют заключить, что применяемые в настоящее время интегральные методы оценки карстоопасности требуют дальнейшего совершенствования, несмотря на то, что в целом с определенной долей погрешности позволяют решать инженерные задачи. По нашему мнению, современная методология оценки карстоопасности должна выстраиваться исходя из реализации следующих четырех **принципов**:

1) учет основных условий развития карстового процесса, выраженных через набор *природообразующих показателей-факторов*;

2) относительная простота установления показателей природных условий, их инженерно-геологическая направленность и широкая применимость в повседневной изыскательской практике;

3) базирование на *интегральном количественном подходе* с применением вероятностно-статистического математического аппарата, позволяющего осуществлять оценки *вероятности* образования как поверхностных, так и подземных карстовых форм в пределах исследуемой территории, а также устанавливать их *средние морфометрические параметры*;

4) универсальность в отношении однозначности трактовки получаемых результатов независимо от территории и объекта исследования.

В соответствии с **первыми двумя принципами** предложен перечень, состоящий из 17 показателей, разделенных на 5 групп (таблица 1): *структурно-тектоническую St, геологическую G, гидрогеологическую Hg, геоморфологическую Ge* и *инженерно-геологическую Eg*. Большинство из предлагаемых показателей являются широко распространенными в практике карстологических исследований (показатели геологической, гидрогеологической и инженерно-геологической групп).

Таблица 1. Показатели природного строения к интегральной оценке карстоопасности

Структурно-тектонические показатели St:

- Линейная плотность линеаментов L_l , км/км²
- Количество пересечений линеаментов M_l , шт./км²
- Блочность B_l , км²
- Удаленность от линеаментов R_l , м

Геологические показатели G:

- Мощность отложений покровной толщи (глубина залегания кровли карстующихся отложений) m_p , м
- Мощность четвертичных отложений m_Q , м
- Мощность неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений m_{NQ} , м
- Мощность некарстующихся скальных (коренных) отложений в покровной толще $m_{ск}$, м

Гидрогеологические показатели Hg:

- Глубина установления грунтовых вод H_Q , м
- Глубина установления трещинно-карстовых вод H_k , м
- Минерализация подземных вод M , г/дм³

Геоморфологические показатели Ge:

- Уклон рельефа β , градус
- Превышение над средним уровнем рек ΔH , м
- Удаленность от речной сети U , м
- Уклон водосбора $\tan \alpha$, д.е.

Инженерно-геологические показатели Eg:

- Модуль общей деформации грунтов покровной толщи E_0 , МПа
- Угол внутреннего трения грунтов покровной толщи φ , градус
- Удельное сцепление грунтов покровной толщи c , кПа

Реализация **третьего и четвертого принципов** осуществлена путем массового статистического анализа морфометрических параметров различных карстовых форм. В результате установлен ряд закономерностей, позволяющих осуществлять взаимный прогноз средних диаметров и глубин поверхностных карстовых форм, а также морфометрических характеристик одних карстовых форм по значениям других, исходя из знания их статистических распределений.

При разработке методики интегральной оценки карстоопасности в анализе участвовали как поверхностные, так и подземные карстовые формы. Среди поверхностных форм карста в анализе принимают участие провальные и карстово-суффозионные карстовые воронки и понижения, для краткости изложения в дальнейшем именуемые *провалами*. Исследуются как древние провалы, точное время образования которых не установлено, так и молодые, сформированные в течение периода наблюдения за процессом провалообразования. Подземные карстовые формы, участвующие в анализе, представлены *карстовыми полостями* и *зонами дробления*, установленными по данным буровых работ.

В качестве исследуемых параметров карстовых форм выступают: у поверхностных карстовых форм – *диаметры d* и *глубины z* провалов; у подземных – *высоты h_p* и/или *мощности h_z* вскрытых бурением карстовых полостей и/или зон дробления.

Для поверхностных карстовых форм, развитых в пределах исследуемых территорий, наблюдается прямая корреляция между их средними диаметрами и глубинами. Причем в большинстве случаев эта связь носит явный тесный характер. В таблице 2 приведены регрессионные уравнения, которые рекомендуется использовать в качестве прогнозных.

Таблица 2. Зависимости глубин провалов от их средних диаметров

Территория исследования	Генеральная совокупность		Выборочная совокупность		Прогнозное уравнение
	кол-во пар значений, шт.	коэффициент корреляции, д.е.	кол-во пар значений, шт.	коэффициент корреляции, д.е.	
г. Кунгур	412	0,35	295	0,78	$z = 0,2955d$
пгт Полазна	209	0,79	166	0,96	$z = 0,3547d$
Ординский район	1861	0,65	1633	0,85	$z = 0,2891d$
пос. Октябрьский	76	0,64	60	0,88	$z = 0,2803d$
ОБЩЕЕ	2558	0,68	1968	0,92	$z = 0,3107d$

С целью осуществления взаимного прогноза морфометрических характеристик различных карстовых форм применен комплекс, включающий следующие три метода исследования: 1) сопоставление кривых распределений основных морфометрических параметров карстовых форм; 2) оценка площадного развития равных интервалов значений морфометрических параметров; 3) картографическое сопоставление площадей с общими интервалами изменчивости морфометрии карстовых форм.

Сопоставление распределений морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм друг с другом осуществляется путем приведения их к общему виду посредством нормализации. Для этого каждое частное значение рассматриваемой морфометрической характеристики делится на ее территориальный максимум – максимальное значение в пределах всей исследуемой территории. Таким образом, получаются *индексные оценки I* исследуемых морфометрических характеристик карстовых форм и зон дробления:

$$I d_i = \frac{d_i}{\max d}, \quad I z_i = \frac{z_i}{\max z}, \quad I h_{pi} = \frac{h_{pi}}{\max h_p}, \quad I h_{zi} = \frac{h_{zi}}{\max h_z}, \quad (1)$$

где $I x_i$ – индексная оценка i -го значения исследуемого морфометрического параметра x , д.е.

Преимущество использования индексных оценок заключается не только в возможности сравнивать разноразмерные характеристики друг с другом, но и в том, что в результате такой операции новые значения каждой из характеристик изменяются в одинаковых пределах – от 0 до 1. При этом, чтобы получить истинные значения характеристики,

достаточно выполнить обратную операцию – умножить ее индексное значение на территориальный максимум.

Дифференциальные кривые распределения, построенные по индексным оценкам средних диаметров, глубин и мощностей карстовых форм, отражают логнормальный характер распределения этих параметров и совпадают между собой как при исследовании в рамках отдельных территориальных единиц, так и в целом в пределах всех анализируемых территорий (рисунок 3). Это обстоятельство позволяет вместо набора кривых распределений каждого из отдельных морфометрических параметров использовать одно распределение, в интегрированной форме отражающее каждое из них. Совпадение индексных оценок различных морфометрических параметров между собой позволяет ввести самостоятельный показатель – *общий индекс морфометрии I*. Данный индекс характеризует как распределения средних диаметров и глубин провалов, так и вертикальных размеров полостей и зон дроблений.

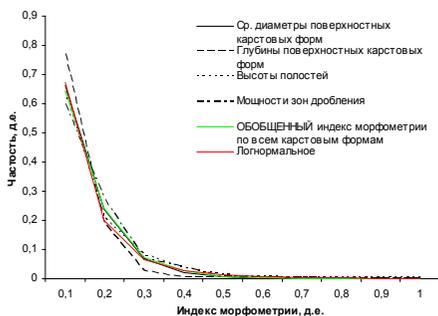


Рисунок 3. Дифференциальные кривые распределения индексных оценок морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм

Подтверждением взаимосвязи между морфометрией поверхностных и подземных карстовых форм может служить анализ их площадного развития в равных интервалах, а также картографическое сопоставление площадей их распространения. По его результатам было установлено, что площади развития подземных и поверхностных карстовых форм с близкими морфометрическими параметрами, выраженными в индексной форме, совпадают друг с другом с точностью до 80-90%. Данное обстоятельство свидетельствует о тесном характере взаимосвязи между средними диаметрами провалов и высотами полостей и зон дробления.

Их взаимный прогноз выстраивается исходя из общего распределения индексных оценок (таблица 3, рисунок 4).

Таблица 3. Рекомендуемые параметры для предварительной оценки средних диаметров поверхностных и высот подземных карстовых форм и зон дробления на территории Пермского края

Карстовые формы	Максимальное значение диаметра (высоты) карстовой формы, м	Параметры осредненного логнормального закона распределения всех морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления в индексной форме выражения	
		среднее значение	среднеквадратическое отклонение
Провалы	100,0	-2,74	1,02
Полости	18,0		
Зоны дробления	31,5		

Следует понимать, что установленная зависимость не является универсальной. Она лишь выражает принципиальный характер взаимосвязи между исследуемыми размерами поверхностных и подземных карстовых форм. Однако в природе нередки случаи, когда фиксируются значительные отклонения от установленной взаимосвязи. Это во многом предопределяется действием целого ряда природных факторов развития карста, взаимный анализ которых в сопоставлении с карстовыми формами позволяет уточнять полученные оценки морфометрических параметров последних.

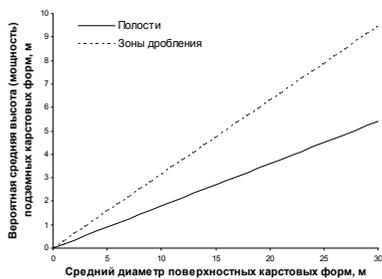


Рисунок 4. Взаимосвязь между средними диаметрами провалов и высотами (мощностями) карстовых полостей и зон дробления

Оценка влияния рассматриваемых показателей природного строения на интенсивность развития карста осуществлена посредством их сопоставления с исследуемыми карстовыми формами и их параметрами по специально разработанной методике. Она заключается в установлении: 1) эмпирических и теоретических распределений карстовых форм по показателям природного строения; 2) характера зависимости морфометрических параметров карстовых форм от значений исследуемых показателей. Для этого использованы частные методы картографического и графического моделирования с последующей аналитической обработкой количественных данных.

Установление взаимосвязи между значениями показателей природного строения, количественным проявлением и параметрами карстовых форм осуществляется посредством картографического моделирования, которое выполняется поэтапно. На первом этапе методами интерполяции строятся картографические модели изменчивости значений исследуемых показателей. Далее на эти модели «накладываются» рассматриваемые карстовые формы, каждой из которых присваивается значение показателя в точке ее локализации.

С целью возможности разнопланового сопоставления и сравнения результатов исследуемые показатели природного строения приводятся к общему виду посредством их нормализации в ходе расчета индексных значений. Данная процедура аналогична таковой, производимой в случае изучения морфометрических параметров карстовых форм.

Количественное распределение карстовых форм по показателям природного строения выражается в графической форме в виде гистограмм или кривых плотности распределения (рисунок 5). После выявления частных распределений рассматриваемых разновидностей карстовых форм по отдельности устанавливается общее распределение всех рассматриваемых в анализе форм карста путем совместного осреднения их частостей. Это распределение в интегральной форме суммирует вклад всех отдельных карстовых форм. По формам эмпирических кривых общих распределений подбирается наиболее подходящее *теоретическое распределение*. В анализе рассматриваются два основных теоретических закона распределения – *нормальный* и *логарифмически нормальный*. Эти распределения присущи практически всем природным элементам, что неоднократно подчеркивалось исследованиями многих авторов, а их использование оправдано простотой и удобством получения конечного результата.

Оценка взаимосвязи между морфометрическими параметрами карстовых форм и показателями природного строения осуществляется путем их прямого сопоставления. Дифференцированно по каждому из типов карстовых форм строятся двумерные облака точек, характеризующие зависимость морфометрических параметров от значений исследуемых показателей. Однако диаграммы, представленные в форме облака точек, не являются информативными, так как в большинстве случаев по ним невозможно установить даже приблизительный характер связи. Извлечь информацию об имеющемся тренде позволяет операция осреднения значений морфометрических параметров карстовых форм в равных интервалах значений исследуемых показателей (рисунок 6). Данная процедура позволяет оценить направленность наблюдаемой зависимости, а в некоторых случаях и установить ее характер.

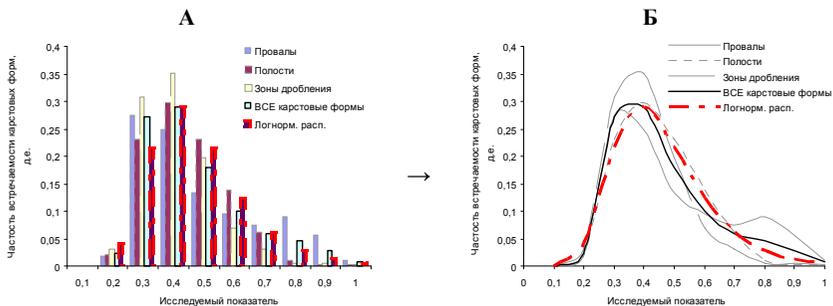


Рисунок 5. Пример осуществления графического анализа распределений карстовых форм по показателям природного строения, выраженным в индексной форме, и представленного:
 А – в виде гистограмм; Б – в виде кривых плотности распределения

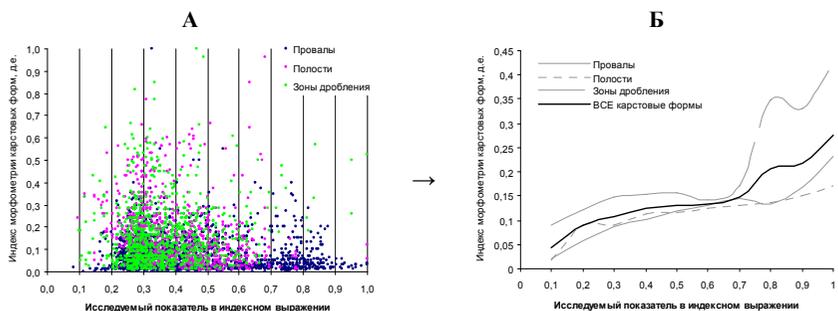


Рисунок 6. Определение тренда зависимости морфометрических параметров в карстовых форм от значений исследуемого показателя (пояснение см. в тексте)

В преобладающем ряде случаев на фоне тренда наблюдаются отклонения средних значений морфометрических параметров от общей направленности. Иногда такие отклонения выражены в форме резких скачкообразных перегибов кривой тренда. Как правило, отклонения от общей направленности носят случайный характер и представлены главным образом в тех интервалах значений исследуемых показателей, в пределы которых попадает относительно небольшое количество карстовых форм. При обработке тренда аномальные отклонения (менее 5% карстовых форм в классе), несвойственные общей зависимости, исключаются из анализа.

В процессе анализа карстовых форм и показателей природного строения, рассматриваемых в рамках выделенных групп, установлены следующие закономерности:

- Распределения карстовых форм по значениям показателей структурно-тектонической группы подчиняются логнормальному закону распределения. Степень соответствия наблюдаемых распределений теоретическим законам оценивается как очень высокая. Зафиксировано снижение средних морфометрических параметров карстовых форм с ростом значений показателей линейной плотности и количества пересечений линеаментов и их увеличение с возрастанием удаленности от линеаментов и линеаментной блочности.
- Карстовые формы распределены логнормально по мощности четвертичных отложений и общей мощности покровной толщи. Нормальный характер носит распределение карстопроявлений по значениям мощности неоген-четвертичной обвальнокарстовой толщи. Степень соответствия теоретических распределений эмпирическим

аналогам оценена выше средней. С увеличением мощностей исследуемых толщ отмечается устойчивая тенденция к возрастанию средних диаметров провалов, высот и мощностей полостей и зон дробления.

- При исследовании показателей гидрогеологической группы отмечен логнормальный характер распределения карстовых форм по их значениям. Высокая прогностическая способность установлена для показателя глубины установления грунтовых вод, выше средней и средняя – для глубины установления трещинно-карстовых вод и минерализации подземных вод соответственно. Возрастание значений гидрогеологических показателей приводит к увеличению морфометрических характеристик карстовых форм, что наиболее четко прослеживается для глубины установления трещинно-карстовых вод и минерализации. Общая направленность данной зависимости при исследовании грунтовых вод выражена слабо с характерным резким скачком в сторону возрастания морфометрических параметров при глубоком положении зеркала подземных вод.

- Логнормальный характер распределений карстовых форм характерен для таких показателей геоморфологического строения, как уклон рельефа, удаленность от рек и уклон водосбора. Тяготение большей части карстовых форм к средним и чуть выше среднего значениям показателя превышения над среднегодовым уровнем рек в лучшей степени описывается нормальным законом. Степень соответствия эмпирических распределений их теоретическим аналогам очень высокая для показателей уклона рельефа и уклона водосбора, высокая и удовлетворительная соответственно для показателей удаленности от речной сети и превышения над уровнем рек. Тенденция к снижению диаметров и высот (мощностей) поверхностных и подземных карстопоявлений отмечена с ростом значений уклона поверхности рельефа и уклона водосбора. Возрастание превышения рельефа над уровнем рек и удаленности от рек, наоборот, приводит к увеличению морфометрических параметров.

- Показатели инженерно-геологической группы характеризуются однородным и ровным распределением карстовых форм по их значениям. Логнормальный характер распределения установлен для модуля общей деформации и угла внутреннего трения грунтовой толщи, нормальный – для удельного сцепления. Точность описания эмпирических распределений теоретическими законами очень высокая. Установлена прямая зависимость средних диаметров, высот и мощностей исследуемых карстовых форм от модуля общей деформации и угла внутреннего трения. В последнем случае ее характер неявный. Снижение морфометрических параметров карстовых форм наблюдается на фоне возрастания значений сцепления.

С целью оценки *вероятности возникновения опасной ситуации*, установленные теоретические распределения карстовых форм по исследуемым показателям природного строения предлагается анализировать в двух направлениях – в результате расчета *интегральных F* и *дифференциальных f* функций распределения (таблица 4):

$$F = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} - \text{нормальный закон}; \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(\ln x_i - \ln \bar{x})^2}{2\sigma_{\ln x}^2}} - \text{логнормальный закон}, \quad (3)$$

где σ_x и $\sigma_{\ln x}$ – среднеквадратическое отклонение показателя природного строения в случае нормального и логнормального распределений соответственно; \bar{x} и $\ln \bar{x}$ – среднее значение показателя в случае нормального и логнормального распределений соответственно; x_i и $\ln x_i$ – частные значения исследуемого показателя природного строения в случае нормального и логнормального распределений соответственно; a и b – пределы интегрирования.

Таблица 4. Параметры распределений и зависимостей для прогнозирования вероятности образования и индекса морфометрических параметров карстовых форм по показателям природного строения

№ п/п	Показатели природного строения	Максимальное значение	Прогноз вероятности образования карстовых форм *			Прогноз морфометрических характеристик карстовых форм в индексном выражении		
			Параметры теоретического закона распределения		Закон распределения	Коэффициенты прогнозного уравнения		Характер зависимости
			среднее x_{cp}	станд. отклон. σ		a	b	
<i>Структурно-тектоническое строение St</i>								
1	L_I	14,7	-0,91	0,49	логнорм.	0,5092	-0,3081	экспонен.
2	M_I	70,7	-2,23	1,26	логнорм.	0,3797	-0,0611	экспонен.
3	B_I	2,9	-2,53	1,17	логнорм.	0,0116	1,6450	экспонен.
4	R_I	665,0	-2,12	1,09	логнорм.	0,0003	0,0049	линейная
<i>Геологическое строение G</i>								
5	m_p	80,7	-2,02	1,38	логнорм.	0,0049	0,0075	линейная
6	m_O	36,6	-2,32	1,29	логнорм.	0,0105	0,1080	экспонен.
7	m_{NO}	65,0	0,19	0,15	норм.	0,0099	0,0984	экспонен.
<i>Гидрогеологические условия Hg</i>								
8	H_D	19,60	-1,37	0,62	логнорм.	0,3162	-0,2667	экспонен.
9	H_k	81,40	1,39	0,96	логнорм.	0,0056	0,0067	линейная
10	M	21,20	-2,73	0,89	логнорм.	0,0384	0,8066	степенная
<i>Геоморфологические условия Ge</i>								
11	β	47,3	-3,57	0,98	логнорм.	0,0992	-0,7463	степенная
12	ΔH	114,7	0,52	0,18	норм.	0,0065	0,0406	экспонен.
13	U	3028,7	-1,65	0,90	логнорм.	0,0001	-0,0093	линейная
14	$\tan \alpha$	2,22	-3,34	0,74	логнорм.	0,0048	-0,8475	степенная
<i>Инженерно-геологические условия Eg</i>								
15	E_D	39,60	-0,98	0,37	логнорм.	0,0215	0,0924	экспонен.
16	ϕ	38,40	-0,62	0,26	логнорм.	0,0105	0,1144	экспонен.
17	c	58,50	0,38	0,15	норм.	1,5155	-1,1148	степенная

* Параметры теоретических распределений выражены в индексной форме

Расчет дифференциальных функций ведется по тем же формулам, что и интегральных, но без интегрирования экспоненты.

Вероятностные оценки по интегральной функции распределения могут быть применены при исследованиях в пределах некоторой площади, в границах которой устанавливаются *минимальное* a и *максимальное* b значения показателя природного строения, являющиеся пределами интегрирования. В данном случае оцениваемой величиной будет *интервальная вероятность* Pab образования карстовых форм:

$$Pab = Fb - Fa . \quad (4)$$

Точность оценки по вероятности Pab будет зависеть от размеров исследуемого участка и степени однородности природных условий в его пределах.

В целях районирования территории по степени карстоопасности в условиях недостатка информации наиболее удобным является расчет *полной интервальной вероятности* Pb образования карстовых форм, нижний предел интегрирования a при вычислении которой принимается равным 0, а верхний b – значению анализируемого показателя природного строения в исследуемой точке карстового массива:

$$Pb = 2Fb - \text{при } Fb \leq 0,5 ; \quad (5)$$

$$Pb = 2(1 - Fb) - \text{при } Fb > 0,5. \quad (6)$$

В качестве альтернативы величины Pb может быть использована так называемая *относительная вероятность образования карстовых форм* p :

$$p = \frac{f}{f(\bar{x})}, \quad (7)$$

где f и $f(\bar{x})$ – дифференциальные функции, рассчитанные соответственно для исследуемого и среднего значений показателя природного строения.

Величины Pb и p изменяются от 0 до 1, что удобно при районировании не только конкретным ограниченной площади или линейного участка, но и при решении задач, связанных со сравнением карстологических условий и опасности проявления процесса в различных природных обстановках развития карста. Преимуществом использования этих параметров является возможность их расчета в любой конкретной точке исследуемой территории (например, по показателям, установленным в отдельной взятой скважине) без привязки к конкретной площади или исследуемому участку в целом. Однако следует учитывать, что параметры Pb и p не являются реальными вероятностными величинами. Они только в некоторой пропорции отражают активность и опасность развития карста в конкретных природных условиях.

Прогнозирование средних диаметров провалов, а также **высот** полостей и зон дробления в зависимости от значений показателей природного строения осуществляется с учетом установленных трендов соответствующих зависимостей (см. таблицу 4). По установленному тренду изменчивости средних значений морфометрических параметров карстовых форм для каждого из исследуемых показателей природных условий подбирается вид прогнозной кривой наблюдаемой зависимости, определяется ее уравнение. Прогнозная кривая подбирается аналитическим методом в результате вычленения из общего облака точек как можно большего количества тех из них, которые в максимальной степени «ложатся» на выявленный тренд. Для этого используется Microsoft Office Excel и встроенный в него язык программирования Visual Basic for Applications, в среде которых автором был разработан алгоритм, позволяющий в автоматизированном режиме с учетом указанного экспертом тренда и характера зависимости (линейная, экспоненциальная, степенная или логарифмическая) выстраивать наиболее оптимальную прогнозную кривую:

$$I = ax + b - \text{линейная зависимость}; \quad (8)$$

$$I = a \ln x + b - \text{логарифмическая зависимость}; \quad (9)$$

$$I = a \cdot e^{bx} - \text{экспоненциальная зависимость}; \quad (10)$$

$$I = a \cdot x^b - \text{степенная зависимость}, \quad (11)$$

где I – прогнозный индекс морфометрии, д.е.; x – исследуемый показатель природного строения, выраженный в истинной форме; a и b – коэффициенты прогнозного уравнения.

Вероятностные оценки карстоопасности (Pab , Pb , p) и прогнозные значения морфометрических характеристик карстовых форм в индексном выражении (I) (далее – параметры опасности X) рассчитываются для каждого показателя природного строения. Интегральная оценка этих характеристик устанавливается из частных оценок, полученных по отдельным показателям природного строения и сгруппированным в соответствующие группы в зависимости от генетической принадлежности показателей. Математически интегральный расчет записывается в следующем виде:

$$X = a_{Si} X_{Si} + a_G X_G + a_{Hg} X_{Hg} + a_{Ge} X_{Ge} + a_{Eg} X_{Eg}, \quad (12)$$

где a_i – весовые коэффициенты; X_i – среднее групповое значение параметра опасности.

Применение весовых коэффициентов в интегральной модели позволяет устанавливать уровень значимости частных оценок по каждой из отдельных групп показателей. Это справедливо в тех случаях, когда установлено, что в пределах исследуемой территории особая роль в развитии карста принадлежит показателям строения определенной группы или, например, показатели определенных групп установлены весьма неоднозначно.

Оптимальное решение интегральной модели, в максимальной степени отвечающее реальной обстановке, в каждом конкретном случае различно. Поиск такого решения заключается в определении весовых коэффициентов, при которых вклад каждого отдельно

взятого элемента (групп показателей природного строения) учитывается максимально объективно.

Сопоставление рассчитанных интегральных значений вероятностей Pab , Pb и p с результатами ранее производимого районирования пилотных территорий по интенсивности провалообразования (согласно СП 11-105-97, ч. II) за 100-летний срок с выделением соответствующих категорий устойчивости позволило осуществить их качественную экспертную корреляцию. В результате была построена шкала для перехода от интегральных параметров карстоопасности к нормативным категориям устойчивости (таблица 5).

Таблица 5. Сопоставление значений Pab , Pb и p с категориями устойчивости по интенсивности провалообразования λ

A	VI	V	IV	III	II	I
Pab	0	0 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	>0,25
Pb	0	0 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,8	0,8 – 1,0
P	0	0 – 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	0,8 – 0,9	0,9 – 1,0

Данная шкала адаптирована применительно к условиям развития карбонатно-сульфатного карста Пермского Предуралья. Несмотря на это, с определенной долей погрешности ее применение может быть найдено при инженерно-геологической оценке карбонатно-сульфатного карста, локализованного в рамках различных территориальных единиц.

Глава 4. Практическое применение интегрального подхода при оценке карстоопасности

Четвертая глава диссертации состоит из двух разделов и посвящена практическому применению установленных зависимостей и разработанному на их основе подходу к оценке карстоопасности, который апробирован на ряде карстологических объектов Пермского края, в пределах которых в период с 2011 по 2012 гг. выполнялись комплексные инженерные изыскания. Результаты практического применения интегрального подхода показали, что его использование в одинаковой степени эффективно как при изысканиях под линейные, так и под площадные объекты. Наиболее показательными в данном случае являются примеры его применения при изысканиях на *трассе водовода* в пределах Солдатковского нефтяного месторождения и на *площадке строительства поглощающих скважин* на Кокуйском нефтегазовом месторождении.

Нормативные категории устойчивости в пределах территорий локализации исследуемых объектов установлены по результатам их предварительного районирования по условиям развития карста. Расчетные показатели опасности – интенсивность провалообразования λ и средние диаметры провалов d – определялись на основании полевых рекогносцировочных карстологических съемок, сопровождавшихся фиксацией поверхностных карстовых форм и прочих проявлений карста.

В основу интегральной оценки карстоопасности исследуемых объектов положены данные о природном строении территории, формализованные в виде набора показателей, регламентированных методикой. В качестве опорных точек для установления значений показателей используются скважины, пройденные в ходе изысканий. Параметры опасности рассчитаны для каждого из отдельных показателей природного строения, а впоследствии усреднены в рамках каждой из групп. Итоговые интегральные значения параметров опасности по всем группам показателей природных условий рассчитаны согласно интегральной модели. Оценка прогнозных значений средних диаметров провалов осуществлена в результате умножения интегрального индексного значения показателя морфометрии на их максимум, установленный в пределах пилотных территорий.

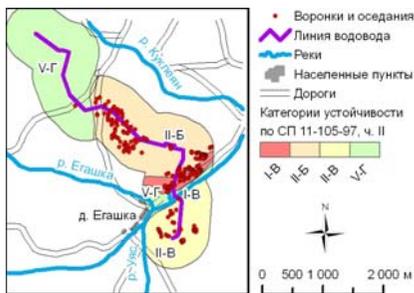


Рисунок 7. Районирование трассы водовода по степени устойчивости территории к карстообразованию с применением нормативного подхода

На рисунках 7 и 8 отражены результаты нормативной и интегральной оценок карстоопасности территории прохождения трассы водовода. Как видно из рисунков, применение интегрального подхода позволяет зачастую с большей детализацией подходить к оценке карстоопасности. Такая оценка с определенной степенью объективности позволяет назначать категории устойчивости даже в пределах слабо изученных участков или тех из них, в границах которых по результатам карстологической съемки поверхностные карстовые формы представлены крайне ограниченно или вовсе отсутствуют (северная часть трассы водовода).

При картировании карстоопасности участка трассы водовода были отмечены

различия в оценках, осуществленных с применением нормативного и интегрального подходов. Следует отметить, что оба они с разных сторон характеризуют некоторую истинную картину существующих в пределах исследуемой территории опасностей, связанных с активизацией карстового процесса. Статистический анализ распространения закартированных воронок показал, что в случае применения как нормативной, так и интегральной методик их большая часть приходится на наиболее опасные в отношении интенсивности провалаобразования участки. В то же время статистический анализ морфометрических параметров воронок, закартированных в период изысканий, показал, что их средние значения в пределах выделенных на интегральных моделях карстоопасных участках в целом соответствуют присвоенной на основании прогноза по показателям природного строения категории устойчивости.

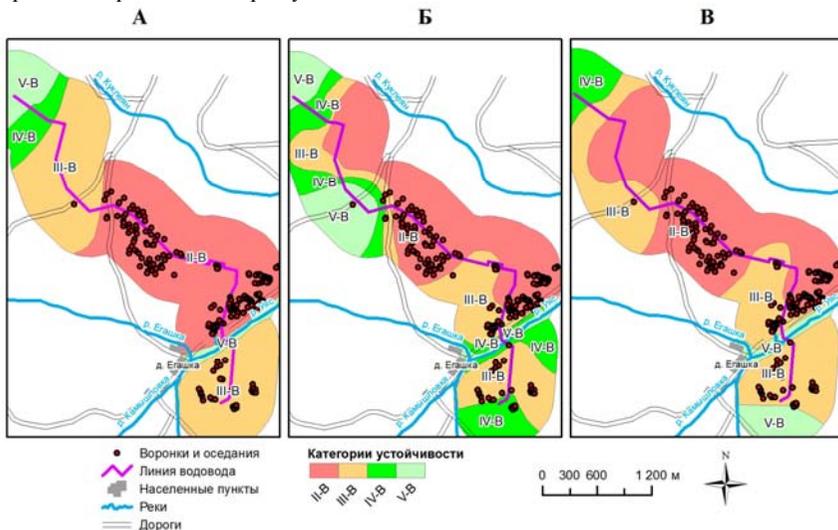


Рисунок 8. Интегральная оценка карстоопасности участка трассы водовода: А – по параметрам $Pab - d$; Б – по параметрам $Pb - d$; В – по параметрам $p - d$

По результатам оценки карстоопасности нормативным способом, территория площадки строительства поглощающих скважин на Кокуйском нефтегазовом месторождении характеризуется категорией устойчивости IV-Б с расчетной интенсивностью провалообразования равной 0,049 шт./км²·год и средним диаметром провала 13,1 м. Заметим, что рассчитанная интенсивность провалообразования, согласно нормативной классификации, находится в приграничной зоне III и IV категорий устойчивости (0,05 шт./км²).

Интегральные категории устойчивости по интенсивности провалообразования, установленные на исследуемой территории по интегральным параметрам опасности, практически полностью совпадают с результатами нормативной оценки. Численные значения параметров P_{ab} и P_b (0,08 и 0,41) также приурочены к пограничной зоне между III и IV категориями. По параметру p оценка несколько занижена (V категория – 0,59), однако и в этом случае его значения находятся на стыке IV и V категорий. Прогнозируемый по интегральной модели средний диаметр провалов в пределах исследуемой площади составляет 11,1 м, отличаясь от фактического среднего диаметра закартированных в ходе полевой карстологической съемки на 2,0 м в меньшую сторону. Категории устойчивости по величине среднего диаметра при этом полностью совпадают.

В дополнение к районированию по степени устойчивости, с применением интегрального подхода в пределах изыскиваемых территорий были оценены вероятные морфометрические параметры подземных карстовых форм – высоты h_p полостей и мощности h_z зон дробления (таблица 6).

Таблица 6. Прогнозируемые морфометрические параметры подземных карстовых форм

Морфометрическая характеристика	Трасса водовода			Площадка поглощающих скважин		
	min	max	среднее	min	max	среднее
h_p	0,1	8,6	1,7	1,9	2,1	2,0
h_z	0,3	15,1	3,0	3,4	3,6	3,5

Рассмотренные примеры применения интегрального подхода к оценке карстоопасности в пределах закарстованных территорий Пермского края, приуроченных к области развития карбонатно-сульфатного карста западного склона Уфимского плато, свидетельствуют о целесообразности его использования при решении подобного рода задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований сформулирована методология оценки карстоопасности, на базе которой разработан и предложен конкретный методический подход для осуществления оценки. Разработанная методика интегральной оценки карстоопасности успешно апробирована в пределах двух закарстованных участков Пермского края, локализованных в различных структурно-тектонических и геолого-гидрогеологических условиях. Результаты практического применения интегрального подхода показали, что его использование в одинаковой степени эффективно как при изысканиях под линейные, так и под площадные объекты.

Положительными моментами интегральной оценки являются:

- объективное начало – в основу подхода положены сведения об основных условиях и факторах развития карста, сведенные к комплексу фундаментальных взаимосвязей и зависимостей между особенностями природного строения карстовых массивов и активностью и масштабами проявления процесса на поверхности земли и в толще пород;
- входные данные – набор легко устанавливаемых в повседневной изыскательской практике количественных показателей природного строения, в максимальной степени объективно отражающих условия протекания карстового процесса;

- относительная простота осуществления расчета – алгоритм расчета интегральной модели сводится к последовательному выполнению простых математических операций;
- вариативность оценочных параметров опасности – для оценки активности протекания карстового процесса предложено три количественных параметра (Pab , Pb , p), которые могут быть применены как по отдельности, так и в совокупности; параметр Pab является в полной мере вероятностной характеристикой, отражающей частоту образования карстовых форм на некоторой исследуемой площади, что позволяет применять его в расчетных моделях при оценке карстовых рисков;
- возможность оценки карстоопасности как в площадном отношении (параметры Pab , I), так и в конкретной точке массива (параметры Pb , p , I);
- адаптация к нормативной классификации – для районов развития карбонатно-сульфатного карста Пермского края в результате проведенной экспертной корреляции составлены шкалы, позволяющие переходить от интегральных вероятностных характеристик опасности (Pab , Pb , p) к категориям устойчивости по интенсивности провалообразования, рассчитанной за 100-летний период (СП 11-105-97, ч. II);
- разноплановый прогноз масштабов проявления процесса – возможность прогнозирования не только средних диаметров провалов, но и их средних глубин, а также аналогичных характеристик подземных карстовых форм, локализованных в массиве пород – средних высот полостей и мощностей зон дробления;
- возможность проведения оценки в труднодоступных для непосредственного изучения в полевых условиях районах или в пределах участков с крайне незначительным развитием поверхностных карстопоявлений, где объективное заключение об интенсивности и масштабах провалообразования с применением нормативной методики оценки крайне затруднительно;
- широкие возможности по осуществлению предварительных прогнозов по объектам-аналогам – при определенных условиях входными данными для расчета интегральных параметров опасности могут выступать показатели, установленные для смежных с исследуемой территорией участков, а также в пределах площадей со схожими природными условиями.

Однако помимо положительных сторон методики следует указать и на некоторые имеющиеся недостатки. Наиболее явный из них заключается в неустойчивом характере некоторых зависимостей и распределений карстовых форм и их параметров по показателю природного строения, математические выражения которых заложены в основу интегральной оценки. С этим связаны несколько завышенные значения прогнозируемых средних диаметров провалов при исследованиях на некоторых частных объектах. Исходя из такой ситуации, на современном этапе целесообразным, по-видимому, будет введение некоторого коэффициента, учитывающего ошибку прогноза.

Таким образом, прогностическая точность интегральной оценки карстоопасности находится в прямой зависимости от качества выявленных распределений и взаимосвязей между карстовыми формами и показателями природного строения. Получение более точных математических распределений и зависимостей требует ввода в анализ как можно большего количества фактических данных, характеризующихся максимальной степенью однородности и объективности. Идеализация распределений и зависимостей должна достигаться путем одновременного рассмотрения, с одной стороны, однозначно установленных карстовых форм, по которым имеется полная атрибутивная информация, начиная от даты и места их образования или заложения и начальных морфометрических характеристик и заканчивая их изменчивостью с течением времени, что практически невыполнимо. С другой стороны, значения рассматриваемых показателей природных условий должны устанавливаться из наиболее достоверных источников и по возможности верифицироваться путем комплексирования нескольких методов или подходов, направленных на их определение. Наконец, устойчивость получаемых распределений и

зависимостей в полной мере зависит от расширения географии исследования и вовлечения в процесс их формирования все новых данных.

Из куда более незначительных недостатков и допущений рассматриваемой интегральной методики оценки карстоопасности на фоне вышеотмеченных можно выделить: отсутствие адаптации интегральных параметров опасности к нормативной классификации по степени устойчивости по интенсивности провалообразования в условиях карбонатного карста; невозможность прогноза средних вертикальных размеров отдельно для незаполненных полостей, представляющих наибольшую опасность.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В научных рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК

1. **Щербаков С.В.** Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) / С.В. Щербаков, В.Н. Катаев // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2011. Том 153, кн. 1. С. 203-224.
2. **Щербаков С.В.** Методика изучения взаимосвязей между карстовыми формами и природными условиями территорий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. [Адрес в сети Интернет: www.science-education.ru/105-7232] (дата обращения: 23.10.2012).
3. **Щербаков С.В.** К оценке морфометрических параметров карстовых форм / С.В. Щербаков, В.Н. Катаев // Инженерная геология. № 1. М.: ПНИИИС, 2013. С. 56-64.

В других научных рецензируемых изданиях

4. Катаев В.Н. Особенности геологического строения территории и пространственное распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгур) / В.Н. Катаев, **С.В. Щербаков**, Д.Р. Золотарев, О.М. Лихая, Т.Г. Ковалева // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2009. С. 77-93.
5. Катаев В.Н. Особенности химического состава вод иренского водоносного горизонта и карстопроявления (на примере территории г. Кунгур) / В.Н. Катаев, О.М. Лихая, Т.Г. Ковалева, Д.Р. Золотарев, **С.В. Щербаков** // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2009. С. 66-76.

В сборниках научных трудов конференций

6. Ковалева Т.Г. К характеристике подземной закарстованности территории г. Кунгур / Т.Г. Ковалева, Д.Р. Золотарев, **С.В. Щербаков** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Изд-во Перм. ун-та, 2007. С. 210-212.
7. Дублянская Г.Н. Оценка карстоопасности и устойчивости закарстованных урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) / Г.Н. Дублянская, Т.Г. Ковалева, О.М. Лихая, **С.В. Щербаков**, Д.Р. Золотарев, Д.В. Кошкина // Сергеевские чтения, вып. 10. М.: Изд-во GEOS, 2008. С. 129-134.
8. **Щербаков С.В.** Еще раз о методике оценки карстоопасности закарстованных территорий (на примере г. Кунгур) / С.В. Щербаков, Д.Р. Золотарев, О.М. Лихая, Д.В. Кошкина // Проблемы инженерной геологии карста урбанизированных территорий и водохранилищ. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. С. 306-312.
9. Кошкина Д.В. Обоснование природных подсистем карстомониторинга (на примере г. Кунгур) / Д.В. Кошкина, О.М. Лихая, Д.Р. Золотарев, **С.В. Щербаков** // Проблемы инженерной геологии карста урбанизированных территорий и водохранилищ. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. С. 203-208.
10. **Щербаков С.В.** Прогнозирование устойчивости закарстованных территорий (на примере г. Кунгур) / С.В. Щербаков, Д.Р. Золотарев // Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых геологического факультета Пермского государственного университета: материалы конф. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. С. 164-168.

11. Катаев В.Н. Компьютерное картографирование и моделирование в целях прогнозной оценки карстоопасности / В.Н. Катаев, **С.В. Щербаков**, Д.Р. Золотарев, О.М. Лихая // Сергеевские чтения, вып. 11. М.: Изд-во ГЕОС, 2009. С. 109-114.

12. **Щербаков С.В.**, Золотарев Д.Р. Карст и его прогнозирование с учетом геолого-структурных условий территории (на примере г. Кунгур) / С.В. Щербаков, Д.Р. Золотарев // Материалы докладов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2009» / отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев, А.И. Андреев. [Электронный ресурс]. М.: Издательство МГУ, 2009. С. 21. [Адрес ресурса и тезисов в сети Интернет: http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2009/06_8.pdf].

13. Катаев В.Н. Взаимосвязь особенностей развития иренского водоносного горизонта с проявлениями карста на территории г. Кунгур / В.Н. Катаев, О.М. Лихая, Т.Г. Ковалева, Д.Р. Золотарев, **С.В. Щербаков** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2009. С. 293-296.

14. Катаев В.Н. Содержание работ, направленных на создание основ карстомониторинга / В.Н. Катаев, О.М. Лихая, Т.Г. Ковалева, Д.Р. Золотарев, **С.В. Щербаков** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2009. С. 287-290.

15. Катаев В.Н. Применение методов трехмерного моделирования при оценке карстовой опасности территории / В.Н. Катаев, **С.В. Щербаков**, Д.Р. Золотарев, О.М. Лихая // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2009. С. 290-293.

16. Катаев В.Н. Роль структурно-тектонических особенностей территории в развитии карстовых процессов / В.Н. Катаев, Д.Р. Золотарев, **С.В. Щербаков** // ИнтерКарто/ИнтерГИС 15: устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Мат-лы Межд. конф. – Пермь, Гент: 2009. С. 458-462.

17. Катаев В.Н. Проблема освоения закарстованных территорий / В.Н. Катаев, **С.В. Щербаков**, Д.Р. Золотарев, Т.Г. Ковалева // Геология крупных городов: мат-лы Межд. конф., Санкт-Петербург, 24-25 ноября. СПб: 2009. С. 53-54.

18. **Щербаков С.В.** Анализ подземной закарстованности на территории Полазненского полуострова // Геология в развивающемся мире: мат-лы I Всерос. конф. студ., асп., и молодых ученых: в 2 т. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. Т. 2. С. 43-46.

19. **Щербаков С.В.** Методика комплексной оценки карстоопасности урбанизированных территорий // Мат-лы Межд. молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010» / отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев, А.И. Андреев, А.В. Андриянов. [Электронный ресурс]. М.: МАКС Пресс, 2010. [Адрес в сети Интернет: http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2010/06-8.rar] (дата обращения: 23.10.2012).

20. **Щербаков С.В.** Физические свойства четвертичных дисперсных отложений и их влияние на активность карста // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: мат-лы регион. науч.-практ. конф. Перм. ун-т. Пермь, 2010. С. 265-268.

21. **Щербаков С.В.** Интегральная оценка карстоопасности центральной части Ординского административного района Пермского края // Тезисы материалов Пятой сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (электронный ресурс). Новосибирск, 2010. [Адрес в сети Интернет: http://sibconf.igm.nsc.ru/sbornik_2010/10_geocology/513.pdf] (дата обращения: 23.10.2012).

22. **Щербаков С.В.** Характеристика подземной закарстованности Полазненского полуострова // Сборник научных трудов по матер. Межд. науч.-практ. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2010». Том 33. Биология, Геология. Одесса: Черноморье, 2010. С. 91-92. [Адрес в сети Интернет: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/component/content/article/132-engineering-geology/1291-shcherbakov-sv>] (дата обращения: 23.10.2012).

23. **Щербаков С.В.** Особенности геоморфологического строения территории и их влияние на активность карста // Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии: мат-лы Всерос. науч. конф. Томск, 2011. С. 582-589.

24. **Shcherbakov S.V.** Integral estimation of karst hazard // Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety. International Conference, Moscow, Russia, September 6-8, 2011. Delegate Papers. Moscow, 2011. P. 236-240.

25. Золотарев Д.Р. Соотношение закарстованности и линеаментов в пределах Полазненского локального поднятия / Д.Р. Золотарев, В.Н. Катаев, **С.В. Щербаков** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: мат-лы регион. науч.-практ. конф. Перм. ун-т. Пермь, 2011. С. 265-268.

26. **Щербаков С.В.** Поверхностные карстовые формы на территории пос. Октябрьский Пермского края // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по мат-лам V науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых с Междунар. участием): в 2 т. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2012. Т. 2. С. 12-15.

27. **Щербаков С.В.** Механические свойства дисперсных грунтов территории г. Кунгур и их влияние на активность карста / С.В. Щербаков, В.Н. Катаев // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: мат-лы Российской конф. с Межд. участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 252-262.

28. **Щербаков С.В.** Прогнозирование вероятных глубин карстовых провалов по значениям их средних диаметров / С.В. Щербаков, В.Н. Катаев // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: мат-лы регион. науч.-практ. конф. Перм. ун-т. Пермь, 2012. С. 157-160.

29. **Щербаков С.В.** Прогнозирование основных морфометрических параметров карстовых форм / С.В. Щербаков, В.Н. Катаев // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: мат-лы Межд. науч.-практ. конф. «ГЕОРИСК–2012». В 2-х т. Т. 1. М.: РУДН, 2012. С. 260-264.

30. **Щербаков С.В.** Особенности геоморфологического строения карстовых массивов и их роль при оценке опасности проявления карста // Инженерная геология и охрана недр: сборник научных трудов, посвященный 35-летию кафедры. Пермь, 2012. Вып. 1. С. 89-96.

31. **Щербаков С.В.** Прогнозирование карстоопасности в зависимости от геологических условий // Вестник молодых ученых ПГНИУ: сб. науч. тр. В 2 т. / отв. ред. К.В. Незнакина; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2012. Т. 1. С. 56-65.

32. **Щербаков С.В.** Показатели геоморфологических условий и их влияние на активность развития карста / С.В. Щербаков, В.Н. Катаев // Региональные исследования природно-территориальных комплексов / Сироткин В.В., Денмухаметов Р.Р. Казань: ИД МедДок, 2012. С. 21-27.

Пописано в печать: 20.08.2013. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз.

Типография Пермского государственного
национального исследовательского университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15