

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д.г.-м.н., профессор В.Н. Катаев

Екатеринбург 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА И ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАРСТООПАСНОСТИ.....	11
1.1. Оценка карстоопасности по поверхностным и подземным карстовым формам	13
1.1.1. Морфометрия поверхностных и подземных карстовых форм.....	14
1.1.2. Пространственно-временное распространение карстовых форм и закарстованности	19
1.2. Оценка карстоопасности по отдельным факторам природных условий	32
1.2.1. Структурно-тектоническое строение	34
1.2.2. Геологическое строение	43
1.2.3. Гидрогеологические условия.....	51
1.2.4. Геоморфологические условия	56
1.2.5. Инженерно-геологические условия.....	58
1.3. Интегральная оценка карстоопасности.....	64
1.3.1. Качественные оценки	64
1.3.2. Полуколичественные оценки	74
1.3.3. Количественные оценки	94
ГЛАВА 2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ТЕРРИТОРИИ.....	111
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАРСТООПАСНОСТИ	132
3.1. Обоснование оптимального набора оценочных показателей природного строения	141
3.2. Карстовые формы, рассматриваемые при интегральных построениях	148
3.3. Взаимосвязи между морфометрией поверхностных и подземных карстовых форм	152
3.4. Взаимосвязи между показателями природного строения и карстовыми формами.....	164
3.4.1. Методика проведения анализа	164
3.4.2. Показатели структурно-тектонической группы	170
3.4.3. Показатели геологической группы	176
3.4.4. Показатели гидрогеологической группы	182
3.4.5. Показатели геоморфологической группы.....	188
3.4.6. Показатели инженерно-геологической группы	194
3.5. Построение интегральной модели карстоопасности	200

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ ОЦЕНКЕ КАРСТООПАСНОСТИ.....	213
4.1. Интегральная оценка карстоопасности трассы водовода	215
4.2. Интегральная оценка карстоопасности площадки строительства поглощающих скважин	233
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	 246
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	 252

ВВЕДЕНИЕ

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 бы наиболее эффективно и на количественном уровне учитывала 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 карстопоявлениях 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 карстоведения. 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. Веск (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. В карстологическом отношении изученные массивы расположены в пределах Полазненского, Нижнесыльвинского, Ирэнского районов, а также района Уфимского плато Пермского края. Здесь развивается преимущественно гипсовый и карбонатно-гипсовый карст. В административном отношении изученные территории – это территории г. Кунгур, пгт Полазна, пос. Октябрьский, а также зона энергокоридора трансрегионального газопровода высокого давления «Ямбург-Елец» на участке Красноясыльского полигона (близ пос. Красный Ясыл Ординского района).

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 карстоведения.

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, осуществленных 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:

1) областной целевой программы «Развитие и использование минерально-сырьевой базы Пермской области на 2003-2005 годы и на перспективу до 2010 года», тема «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области» (2006-2010 гг.);

2) научной программы МУП «Управление капитального строительства» Кунгурского района «Проведение исследований для обоснования возможности строительства малоэтажного усадебного жилья с полным благоустройством д. Поповка, д. Шарташи» (2007 г.);

3) тематических планов по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на тему «Развитие методологии риск-анализа хозяйственного освоения закарстованных территорий» (2011 г.) и «Развитие теории прогноза возникновения опасных геологических процессов на урбанизированных территориях» (2012-2013 гг.);

4) краевой программы по реализации научных проектов международными исследовательскими группами, тема «Развитие методологии риск-анализа хозяйственного освоения и оценки уязвимости подземных вод закарстованных территорий» (2012-2014 гг.);

5) научной программы ОАО «Объединенная химическая компания «УРАЛХИМ» «Комплексная оценка гидрогеологического и инженерно-геологического состояния территории промышленной площадки филиала «Азот» ОАО «Объединенная химическая компания «УРАЛХИМ» в г. Березники и разработка мер по предупреждению развития опасных геологических процессов» (2011-2012 гг.).

В работе использованы данные, в разное время предоставленные рядом научно-производственных и изыскательских организаций: Кунгурская лаборатория стационар при Горном институте УрО РАН, ОАО «ВерхнеКамГИСИЗ» (Пермь), ОАО «Пермгипроводхоз» (Пермь), ООО «Карбон» (Ижевск), филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Пермнипинефть», 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, выполняемых в рамках выше обозначенных целевых и тематических научных программ 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. Научные результаты обсуждались на 18 научных, научно-производственных конференциях, симпозиумах и совещаниях различного ранга: региональной научно-практической конференции «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (Пермь, 2009, 2010, 2012); конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Пермского государственного университета (Пермь, 2008); Всероссийской международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2010, 2012); конференции научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения» (Москва, 2009); XVI и XVII международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2009, 2010); международной конференции «Геология крупных городов» (Санкт-Петербург, 2009); пятой Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2010); международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2010» (Одесса, 2010); Всероссийской научной конференции «Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии» (Томск, 2010); международной конференции «Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety» (Москва, 2011); Российской конференции с международным участием «Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях» (Уфа, 2012); VIII международной конференции «Геориск-2012» (Москва, 2012); VIII научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (Москва, 2012); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Чтения, посвященные 100-летию со дня рождения А.В. Ступишина» (Казань, 2012).

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 неимоверную помощь в процессе сбора и анализа материалов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА И ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАРСТООПАСНОСТИ

В современном инженерном карстоведении известно более двух десятков определений термина «карстоопасность», предложенных в разные годы разными авторами. Почти все авторы приписывают ему значение угрозы территории или сооружению и однозначно увязывают карстоопасность с хозяйственной деятельностью человека. По их представлениям вне последнего карстоопасность просто не существует. Суть большинства определений заключается в том, что «карстоопасность» – это не что иное, как техногенно, реже природно-техногенно активизировавшиеся, карстово-суффозионные процессы и явления, представляющие или несущие угрозу, некий материальный ущерб для человека и его хозяйственной деятельности [54]. Иногда в понятие карстоопасности вкладывается более широкий смысл: опасность карста состоит не только в разрушении хозяйственных объектов, но и в восприимчивости карстовых массивов к загрязнениям и их переносу на большие расстояния, подверженности населения этих территорий определенным типам заболеваний.

В карстологической литературе широко распространенным является термин «устойчивость», предложенный З.А. Макеевым и употребляемый по отношению к закарстованным территориям, реже – к сооружениям и хозяйственным объектам. Анализ опубликованной и нормативной литературы показал, что в понятия «устойчивость» и «карстоопасность» вкладывается близкий, а зачастую и одинаковый смысл.

По нашему мнению, наиболее полным является определение карстоопасности, предложенное В.В. Толмачевым и нормативно закрепленное в территориальных строительных нормах Нижегородской области [10]. Под карстоопасностью понимается характер и степень воздействия карстопроявлений на геологическую среду, которые могут привести к разрушению сооружений, нарушению или затруднению их нормальной эксплуатации, а также к недопустимому загрязнению геологической среды, утечкам воды из водоемов и др.

Из приведенного определения следует, что у карстоопасности имеются различные аспекты (типы), в связи с чем она классифицируется отдельно по различным ее типам, в числе которых выделяются следующие:

- Тип А – загрязнение геологической среды.
- Тип В – снижение строительной надежности наземных сооружений вследствие провалов или оседаний. В зависимости от тех или иных видов карстопроявлений целесообразно подразделять карстоопасность типа В на соответствующие подтипы: В₁ (провалы); В₂ (локальные оседания); В₃ (старые карстовые воронки); В₄ (неравномерные осадки); В₅ (общие оседания); В₆ (карстовые или карстово-суффозионные просадки).

- Тип С – возможное осложнение строительства при освоении подземного пространства или устройстве глубоких фундаментов.

- Тип D – утечки воды из водохранилищ и других водоемов.

В разных странах вектор внимания направлен к оценкам карстоопасности различных типов. Например, в США и в странах Западной Европы, наибольшее значение придается карстоопасности типа А, в то время как в России, Германии и Испании – типа В. Карстоопасности типов С и D посвящены работы китайских и греческих специалистов.

Рассмотрению показателей, методик и подходов, применяемых при оценке карстоопасности территорий отечественными и зарубежными исследователями-карстоведами посвящен ряд крупных обзорных работ [67, 119, 149, 151, 188].

Влиянию природных условий на развитие сульфатного карста в прибрежной полосе водохранилищ посвящена работа А.И. Печеркина [119]. В ней автор, на основе изучения опыта прошлых лет, а также по данным собственных наблюдений приводит характеристику активности карстового процесса в зависимости от геолого-гидрогеологических условий, структурно-тектонического облика, геоморфологического строения и химизма подземных вод. Критический анализ ряда количественных показателей и методик оценки карстоопасности по поверхностным карстовым формам, а также расчетно-теоретических моделей и схем, направленных на оценку диаметров карстовых провалов, приведен в работе [149]. В дальнейшем обзорные исследования в области количественных вероятностно-статистических методов оценки карстоопасности были расширены и дополнены в совместном русско-немецком издании «Инженерное карстоведение» [151]. Общий анализ методических подходов и количественных показателей с разных сторон характеризующих карстоопасность проведен авторами учебного пособия «Инженерное карстоведение» [67], изданного в Пермском государственном национальном исследовательском университете.

В настоящем исследовании также приводится анализ накопленного опыта оценки карстоопасности. Однако его рассмотрение, в отличие от предыдущих работ, построено 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. Изучение влияния отдельных факторов природных условий на

активность карста, как правило, сводится к качественной характеристике направленности и интенсивности процесса в зависимости от конкретных условий. Наконец, качественно-количественные оценки по совокупности факторов природных условий и закарстованности относятся к разряду комплексных или интегральных методик, наиболее полно рассматривающих условия развития карста и характер его проявления на поверхности и в массиве пород.

Изложение ранее предлагавшихся подходов в данной главе носит описательный характер без их критического осмысления. Особое внимание уделено отдельным факторами природных условий и их влиянию на опасность проявления карста, а также количественным показателям, которыми они могут быть выражены. Основной упор сделан на рассмотрение комплексных методик, в частности подробному изучению подвергнуты не только сами алгоритмы осуществления некоторых интегральных оценок, но и отдельные факторы природных условий, которые закладывались авторами в итоговые модели, а также механизмы и принципы их учета.

При написании данного обзора не ставилась задача осветить как можно большее число применяемых подходов к оценке карстоопасности. Наоборот, рассмотрению подвергались наиболее показательные, а в некоторых случаях и значимые методики, нередко применяемые в практике карстологических исследований ряда стран. Основной задачей обзора является рассмотрение принципиальных количественных 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.

1.1. Оценка карстоопасности по поверхностным и подземным карстовым формам

Данный раздел посвящен вопросу статистической оценки морфометрических параметров карстовых форм, а также особенностей их развития в пространстве и времени, в отрыве от внешних условий среды протекания карстового процесса. Методы оценки карстоопасности, ориентированные только на изучение карстовых форм широко применяются в современной карстологической практике при характеристике закарстованности. Зачастую, в условиях слабой изученности исследуемой территории, данные методы являются одним из основных источников получения сведений об активности и опасности развития карста. Кроме того, прямое изучение карстовых форм является наиболее простым и доступным способом инженерно-карстологической оценки.

В современном карстоведении известно более 150 количественных показателей, характеризующих особенности развития карстовых форм и их морфометрические параметры. Наиболее полный перечень показателей, используемых при инженерно-геологической оценке

карста, был предложен В.П. Костаревым [82]. Впоследствии этот список неоднократно дорабатывался автором и в настоящее время вошел в территориальные строительные нормы по изысканиям в карстовых районах Пермского края [22]. Анализируя предложенные В.П. Костаревым показатели Г.Н. Дублянская и В.Н. Дублянский [50] подразделили их на четыре группы, в первые три из которых вошли показатели, определяемые непосредственно по анализу карстовых форм и закарстованности массива:

- *Первая группа* показателей характеризует геометрические размеры карстопроявлений и их отношения.
- *Вторая группа* показателей объединяет коэффициенты, представляющие отношения длин, площадей, объемов карстопроявлений или их сумм к аналогичным параметрам карстового массива, а также расстояния карстовых форм друг от друга.
- *Третья группа* показателей оценивает интенсивность процесса через годовой прирост количества, площади или объема карстовых форм, а также изменчивость закарстованности массива в целом.

Далее приводится ретроспективный анализ наиболее значимых и применяемых в практике инженерного карстования показателей и подходов к оценке карстоопасности по поверхностным и подземным карстовым формам.

1.1.1. Морфометрия поверхностных и подземных карстовых форм

Наиболее типичными параметрами морфометрии поверхностных карстовых форм являются их *глубина z* и *диаметры d* по разным осям, а также их производные площадные и объемные характеристики. При оценке подземных карстовых форм (полостей), исходя из доступных в настоящее время методов их исследования, наибольшее внимание уделяется двум морфометрическим характеристикам – *высоте h* (или *вертикальной мощности*) и *ширине l* . По мнению некоторых авторов именно высота полости является главным фактором ее устойчивости [26, 144, 151]. Высота подземных полостей достаточно точно устанавливается по результатам прямых наблюдений в подземных пустотах при условии их доступности для проникновения человека, а также приблизительно оценивается по результатам буровых работ и геофизических методов исследования. Ширину подземных пустот достоверно возможно оценить лишь в результате непосредственного визуального наблюдения в ходе спелеологических работ, а также приблизительно оценить по результатам комплексирования различных геофизических методов.

Морфометрические параметры карстовых форм отличаются большим разнообразием в отношении разброса количественных значений, что определяется многочисленными факторами, влияющими на их формирование (физико-механические характеристики, глубина залегания

карстующихся пород, характер напластований, обводненность покровной толщи, структурно-тектонические особенности и т.д.). По этой причине морфометрические характеристики карстопроявлений рекомендуется рассматривать с позиции вероятностно-статистического анализа [18]. Результаты применения статистических методов прогноза размеров карстовых форм в наиболее полной степени отражают объективные закономерности эволюции массива горных пород.

Впервые эмпирические графики распределения (дифференциальные и интегральные кривые) были построены в 1962 г. И.А. Саваренским для карстового района г. Дзержинска в целом и для отдельных его участков. В настоящее время установлено, что в общем случае диаметры карстовых провалов подчиняются логарифмически нормальному закону распределения, а для некоторых участков, квазиоднородных по влияющим на диаметр провала факторам – усеченному нормальному распределению [5, 40, 48, 55, 56, 81, 107, 151, 179, 207].

Г. Адерхолд [26] отмечает, что в большинстве случаев диаметры провалов постепенно увеличиваются с течением времени вследствие разуплотнения их краевой зоны, в результате чего происходит оползание грунта. Этот процесс зависит от действия внешних экзогенных факторов (сезонные изменения температуры, сила тяжести, деятельность поверхностных вод и т.д.). Таким образом, характерной особенностью распределений диаметров провалов является их различие в зависимости от возраста. Примером может служить распределение диаметров провалов на территории Гессена, Германия [26], где они тяготеют к минимальным величинам и в целом подчиняются логнормальному закону. Это характерно как для молодых, так и для древних провалов. Однако в случае последних максимум встречаемости несколько смещается в сторону увеличения диаметров (на 1-2 м). Данные об увеличении средних диаметров древних карстовых форм в сравнении с молодыми провальными явлениями были получены В.П. Костаревым [83] при анализе карстопроявлений, закартированных на участке магистрального газопровода Уренгой-Ужгород. Аналогичные заключения о влиянии возраста провалов на величину их диаметров были сделаны В.В. Толмачевым и Ф. Ройтером [151], И.А. Саваренским и Н.А. Мироновым [133], W.L. Wilson [263].

Исследованиями последних лет было установлено влияние техногенной нагрузки на диаметры вновь образующихся провалов [55, 56]. Авторами были проведены углубленные исследования диаметров карстовых провалов, закартированных на территории опорного участка магистрального газопровода (Ординский район Пермского края). Вся совокупность провалов была разделена на две группы. В первую вошли провалы, сформированные до, а во вторую – после строительства газопровода. Распределения диаметров провалов этих двух выборок также имели логнормальный вид, с небольшим характерным отклонением в сторону больших значений для провалов, образованных после строительства.

Отмеченный характер распределения диаметров карстовых провалов в отечественной практике инженерного карстоведения учитывается при выделении категорий устойчивости. Общероссийскими [16] и территориальными [10, 21-24] строительными нормами при изысканиях на закарстованных территориях регламентируется выделять 4 категории устойчивости (карстоопасности) по величине *среднего диаметра* d_{cp} провальных карстовых форм. В Нижегородской области согласно [10] предложена более детальная дифференциация, включающая 8 классов устойчивости.

Наличие логнормального характера распределения свойственно не только для диаметров поверхностных карстовых форм, но и для их глубин. Так, по данным анализа карстовых воронок на трех карстовых участках Пермского края К.А. Горбуновой [40] установлены распределения их глубин и диаметров. При этом проанализировано 693 воронки на территории пгт Полазна, 285 воронок на территории д. Посад и 528 воронок в районе р. Усьвы. Все распределения имеют явно выраженный логнормальный характер. Частота встречаемости малоглубинных воронок и воронок с небольшими диаметрами несколько выше на территориях развития карбонатного карста. Для территорий сульфатного и сульфатно-карбонатного карста диаметры воронок и их глубины несколько смещаются в сторону увеличения.

Аналогичные результаты были получены Г. Адерхолд [26] при исследованиях на территории Земли Гессена (Германия). Ею установлено, что глубины провалов, возникших в условиях карбонатного карста, как правило, не превышают 1 м, в то время как в условиях сульфатного карста глубины провалов достигают 4 м. Большая часть провалов имеет глубины, не превышающие 1-2 м. Как отмечают китайские исследователи [237], абсолютное большинство закартированных на территории Китая провалов в диаметре и в глубину не превышают 5 м. С дальнейшим ростом морфометрических параметров провалов их количество резко сокращается. Самый большой провал, закартированный в южной части КНР, достигает в диаметре 650 м при максимальной глубине 208 м.

В целом эмпирические распределения глубин разновозрастных провалов, произошедших в различных природных условиях, являются близкими между собой, а в некоторых случаях практически идентичными друг другу, что, по заключению К.А. Горбуновой [40] позволяет перейти к использованию обобщенного теоретического распределения.

Давно подмечено, что диаметры и глубины поверхностных карстовых форм находятся в определенной зависимости друг от друга. Данная взаимосвязь была выявлена К.А. Горбуновой [40], Н.П. Торсуевым и А.М. Трофимовым [154]. Последними были установлены корреляционные связи и составлены уравнения регрессии зависимости глубин воронок от их диаметров. Позже А.В. Ступишиным и др. [142] была установлена множественная взаимосвязь и

составлены уравнения регрессии зависимости глубины карстовых форм от мощности перекрывающих отложений и глубины эрозионного вреза. В наиболее полной форме результаты этих исследований изложены в монографии [155].

В.П. Костаревым [82] предложен численный показатель $П_\phi$, количественно описывающий форму карстового провала:

$$П_\phi = \frac{z_{cp}}{z_0} \quad (1.1)$$

где z_{cp} – средняя глубина карстового провала, м; z_0 – глубина положения центра тяжести карстового провала, м.

Значения показателя $П_\phi$ изменяются от 0 до 1. Значения близкие к нулю характерны для выположенных древних карстовых провалов. Высокие значения этого показателя более свойственны молодым провальным образованиям и косвенно свидетельствуют о значительной глубине и резких откосах их стенок. Промежуточные значения между 0 и 1 часто характеризуют активные в гидрогеологическом отношении провалы, на дне которых развиты поноры, отводящие поверхностный сток в подземные водоносные горизонты.

В практике отечественного инженерного карстоведения широко применяется показатель *глубинности* H карстового провала:

$$H = \frac{z}{d} \quad (1.2)$$

Этот показатель напрямую характеризует степень опасности провала применительно к различным объектам. Большие значения показателя глубинности свидетельствуют о достаточно мелком провале в диаметре, но при этом значительной глубины. Такие провалы могут быть крайне опасны для точечных объектов (опоры ЛЭП, вышки, мачты и т.д.). Значения глубинности близкие к нулю, наоборот, характерны для крупных по площади выположенных карстовых форм. Такие карстопроявления могут быть опасны для площадных сооружений чувствительных к неравномерным осадкам.

Исходя из общего механизма образования карстовых провалов, как результата обрушения кровли подземных карстовых полостей, установлена определенная взаимосвязь между их морфометрическими параметрами. В.В. Толмачев и Ф. Ройтер [151] отмечают, что из двух полостей разных размеров при проявлении их на поверхности земли в виде провалов, для большей полости вероятность образования провалов большего размера больше, чем для полости меньшего размера. Согласно [26] наблюдаемые в Гессене очень большие диаметры провалов (до 100 м), как и очень большие мощности покровной толщи, предполагают наличие полостей высотой до 72 м. Это значение соответствует известной в Гессене мощности закарстованных пород. К аналогичному выводу пришли J. Chen и В.Ф. Beck [198], опираясь на результаты

лабораторного моделирования процесса провалообразования в условиях покрытого карбонатного карста. Ими же было доказано, что высота полости влияет на скорость и время формирования провала. Так, чем больше высота полости, тем в более быстрые по времени сроки произойдет очередной провал.

Е.П. Дорофеевым [46, 47] в результате многолетних наблюдений в районе Кунгурской Ледяной пещеры была установлена взаимосвязь ширины подземных полостей и гротов пещеры с диаметрами и глубинами карстовых воронок на поверхности. Критическое переосмысление этих данных позволило установить тесные взаимосвязи между шириной подземных полостей и диаметрами воронок, а также шириной полостей и глубинами воронок [37]. Коэффициенты корреляции получились равными, соответственно, 0,72 и 0,65. Множественная взаимосвязь ширины полостей с диаметрами и глубинами воронок также получилась тесной с множественным коэффициентом корреляции равным 0,67.

Заметим, что статистические исследования морфометрических параметров подземных карстовых форм практически не освещены в мировой карстологической литературе. Исследования последних лет, проводившиеся сотрудниками Пермского университета, позволили установить логнормальный характер распределения высот карстовых полостей, вскрытых буровыми скважинами на территориях г. Кунгур и пгт Полазна [78, 174].

Знание статистических закономерностей изменчивости морфометрических параметров карстовых форм позволяет прогнозировать наиболее вероятные размеры будущих карстопроявлений. Так, I. Lerche и С. Lempp [242] предлагают использовать следующий алгоритм для оценки любых морфометрических параметров карстовых форм (площади, диаметров, глубины, высоты и т.д.) при известном их распределении. Например, прогнозная величина *среднего диаметра* d_{pr} нового провала определяется исходя из соотношения:

$$d_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i p(d_i)}{\sum_{i=1}^n p(d_i)}, \quad (1.3)$$

где d_i – средний диаметр i -ого провала, м; $p(d_i)$ – частота (вероятность) встречаемости провалов со средним диаметром d_i , определенная по эмпирической или теоретической кривой плотности распределения, д.е.; n – количество исследуемых провалов, шт.

Мерой точности прогнозирования среднего диаметра провала является значение *стандартного отклонения* $S_{d_{pr}}$:

$$S_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{cp})^2}{n - 1} \quad S_{d_{pr}}^2 = S_d^2 - d_{pr}^2 \quad S_{d_{pr}} = \sqrt{S_{d_{pr}}^2}, \quad (1.4)$$

где S_d^2 и d_{cp} – соответственно, дисперсия и среднее значение диаметров частных провалов в исследуемой совокупности, м² и м.

Вероятность p_d образования провала заданного диаметра d определяется по формуле:

$$p_d = 0,5 \left[1 - \tanh \left(\left(\frac{2}{\pi} \right)^{0,5} \frac{d - d_{pr}}{S_{d_{pr}}} \right) \right], \quad (1.5)$$

Прогнозирование морфометрических параметров карстовых форм возможно не только в рамках исследуемой территории. При определенных обстоятельствах распределения морфометрических характеристик карстовых форм, установленные для конкретной территории, могут быть применены в пределах других карстовых районов со схожими природными условиями. Вероятно, при исследовании морфометрических параметров по достаточно большой выборке карстопроявлений возможно установить их статистически устойчивые распределения с одинаковым успехом применимые в любых карстологических условиях.

1.1.2. Пространственно-временное распространение карстовых форм и закарстованности

Среди показателей карстоопасности, оценивающих локальную интенсивность возникновения поверхностных карстовых форм в пространстве и времени, одними из первых были предложены показатели *плотности* ρ и *интенсивности* λ образования провалов:

$$\rho = \frac{n}{S}, \quad \lambda = \frac{n}{S \cdot t}, \quad (1.6)$$

где n – количество поверхностных карстовых форм, шт.; S – площадь локализации поверхностных карстовых форм, км²; t – время образования карстовых форм, год.

Показатель интенсивности образования провалов для оценки устойчивости закарстованных территорий был впервые предложен З.А. Макеевым [99]. В зарубежной практике исследований данный показатель впервые ввел немецкий карстовед Ф. Kammerer [37]. З.А. Макеевым [99], а впоследствии и Г.А. Максимовичем [100] одними из первых были предложены классификационные схемы зонирования закарстованных территорий по категориям устойчивости с использованием показателя интенсивности провалообразования.

Впоследствии показатели плотности и интенсивности провалообразования получили широкое распространение в отечественной инженерно-геологической практике [125, 134]. Некоторые исследователи, например В.П. Костарев [82], предложили применять помимо площадной плотности и интенсивности развития провалов их линейные аналоги – показатели *линейной плотности провалов* ρ_L , и *линейной интенсивности провалообразования* λ_L :

$$\rho_L = \frac{n}{L}, \quad \lambda_L = \frac{n}{L \cdot t}, \quad (1.7)$$

где L – линейно вытянутый участок, в пределах которого локализованы провалы.

Показатель интенсивности провалообразования был рекомендован при оценке устойчивости закарстованных территорий [9], после чего нормативно закреплён с выходом СНиП [13], впоследствии заменённым на СП [16]. В настоящее время оценка устойчивости по показателю интенсивности провалообразования закреплена в качестве основной также рядом территориальных строительных норм, действовавших и действующих в отдельных карстовых регионах Российской Федерации [10, 21-24]. Согласно всем выше приведённым нормативным документам, выделяются 6 категорий устойчивости по интенсивности провалообразования. С выходом [10] в Нижегородской области предложена более детальная дифференциация, включающая 10 классов устойчивости.

В зарубежной практике инженерно-карстологических исследований оценка карстоопасности с применением показателей плотности и интенсивности образования карстопроявлений подобно отечественному опыту также является основной при оценке устойчивости закарстованных территорий [26, 207, 218, 219-221, 227, 228]. Следует отметить, что в США внедрение и применение количественных методов оценки карстоопасности, завязанных на вероятностно-статистическом анализе распределения карстовых форм в пространстве и времени с применением рассмотренных выше показателей началось несколько позже, чем среди специалистов отечественной школы и связано с именами таких исследователей как Н. McConnell и J.M. Horn [246], P.W. Williams [261, 262], J.W. Troester et al. [257], M.J. Thorp и G.A. Brook [256].

Помимо показателей плотности и интенсивности провалообразования достаточно широкое применение в зарубежном карстоведении получил ещё один показатель, близкий по смыслу к последнему – показатель *годовой вероятности образования провала* A_n [227], определяемый по формуле:

$$A_n = \rho \cdot S \cdot 100\% \quad (1.8)$$

В США оценка современного провалообразования часто сопровождается показателем *среднегодовой частоты образования провалов* n_t [258]:

$$n_t = \frac{n}{T}, \quad (1.9)$$

где n – количество провалов, шт., сформированных за время T , лет.

Вероятностную оценку карстоопасности на объектно-локальном уровне с учетом интенсивности образования провалов и их средних диаметров разработал и неоднократно совершенствовал В.В. Толмачев [146-148, 150] в соавторстве с коллегами. Двумя основными принципами его вероятностного подхода к оценке карстоопасности являются применение теории

надежности и наличие логарифмически нормального характера распределения диаметров карстовых провалов. Вероятностная оценка карстоопасности по В.В. Толмачеву заключается в расчете показателя *надежности территории* P_S , который определяется через экспоненциальный закон распределения. Заметим, что данное распределение достаточно широко применяется в теории надежности при расчетах времени наработки на отказ. Так, под надежностью территории P_S площадью S относительно карстовых провалов, образующихся с интенсивностью, которую можно охарактеризовать средним значением показателя интенсивности λ , понимается вероятность того, что в течение расчетного срока t она не будет поражена карстовыми провалами диаметрами, превышающими некоторый размер d :

$$P_S = e^{[-\lambda \cdot S \cdot t \cdot (1 - P_d)]}, \quad (1.10)$$

где P_d – вероятность того, что при образовании провала его диаметр не будет превышать значения d (определяется по интегральной кривой распределения диаметров провалов).

Впоследствии В.В. Толмачевым и М.В. Леоненко [153] был предложен обратный показатель – *вероятность поражения территории карстовыми провалами* P_r :

$$P_r = 1 - P_S \quad (1.11)$$

В зависимости от значений показателя P_r территории могут быть дифференцированы на шесть категорий карстоопасности. В результате совместного рассмотрения показателя P_r в совокупности со средними диаметрами провалов и интенсивностью провалообразования В.В. Толмачевым и М.В. Леоненко предложена интегральная классификация территорий по степени провальной опасности.

В практике инженерного карстования [136] при оценке устойчивости территорий помимо плотности карстопроявлений и интенсивности провалообразования широко применяются еще два похожих показателя – это коэффициенты *площадной* K_s и *объемной* K_v закарстованности, определяемые по формулам:

$$K_s = \frac{S_e}{S}, \quad K_v = \frac{V_e}{S}, \quad (1.12)$$

где S_e и V_e – соответственно, суммарные площади (m^2) и объемы (m^3) карстовых провалов, развитых в пределах исследуемой территории.

Коэффициент площадной закарстованности для оценок устойчивости территорий в карстологических целях был впервые предложен Г.А. Максимовичем [102]. Коэффициент объемной закарстованности был впервые использован И.А. Саваренским [129] и К.А. Горбуновой [40].

И.А. Саваренским [129] были введены еще два важных для практических целей показателя – *вероятность поражения площади карстом* B и *интенсивность объемных потерь территории* q , учитывающие в расчетах временной фактор:

$$B = \frac{S_B}{S \cdot t}, \quad q = \frac{V_B}{S \cdot t} \quad (1.13)$$

А.Л. Рагозин и В.А. Елкин [124] при оценке карстоопасности на территории республики Татарстан ассоциировали показатель B с физическим риском поражения территории карстовыми деформациями. Предложенная ими классификация территорий в зависимости от значений показателя B включает 6 категорий карстоопасности.

Кондиционность количественной оценки развития поверхностных карстовых форм зависит не только от установления характера их распространения в пространстве, но также и от определения времени их образования. К сожалению, последней компоненте при инженерно-карстологической оценке далеко не всегда уделяется должное внимание. На этот факт указывал Г.А. Максимович (1961), рассматривая помимо собственно интенсивности провалообразования и его обратную величину – *количество лет t* , необходимых для образования следующего провала. Данная величина легко выводится из формулы интенсивности провалообразования:

$$t = \frac{n}{\lambda \cdot S} \quad (1.14)$$

В.П. Костарев [82] временной фактор предлагает косвенно оценивать показателем *периодичности T_1* образования провалов:

$$T_1 = \frac{S \cdot t}{n} \quad (1.15)$$

Им же предложено устанавливать *условный возраст T_B* поверхностных провальных карстовых воронок как отношение плотности всех карстовых форм, закартированных на определенной площади, к интенсивности провалообразования, установленной по данным о провалах, произошедших на этой же площади на памяти человека:

$$T_B = \frac{\rho}{\lambda} \quad (1.16)$$

К сожалению, на данном этапе развития инженерного карстоведения приходится признать тот факт, что точное время образования провала над полостью является редко устанавливаемым фактором [198]. Однако приблизительно оценить его можно, опираясь на принципы теории вероятности по результатам изучения временного ряда образования прошлых провалов. Например, в Германии с помощью вероятностного подхода оценивается ориентировочное время необходимое для образования нового провала и вероятность его образования за заданный срок [242]. Ключевой особенностью такого вероятностного подхода к оценке времени является его одинаковая применимость как по отношению к поверхностным, так и к подземным карстовым формам.

Прогнозное время t_{pr} , по прошествии которого образуется новая карстовая форма, осуществляется в результате статистического исследования времени образования предыдущих карстопроявлений:

$$t_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i p(t_i)}{\sum_{i=1}^n p(t_i)}, \quad (1.17)$$

где t_i – период времени, прошедший с момента образования i -й карстовой формы до настоящего времени, лет; $p(t_i)$ – частота (вероятность) образования карстовых форм в соответствующем временном интервале, д.е.; n – количество исследуемых карстовых форм, шт.

Точность прогнозирования времени, по истечении которого может сформироваться новая карстовая форма, зависит от полноты сведений о предыдущих карстопроявлениях (объема исследуемой выборки), степени однородности природных условий территорий, в пределах которой производится оценка, а также от характера внешних воздействий. Мерой точности прогнозирования является значение *стандартного отклонения* $S_{t_{pr}}$:

$$S_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}{n - 1}, \quad S_{t_{pr}}^2 = S_t^2 - t_{pr}^2, \quad S_{t_{pr}} = \sqrt{S_{t_{pr}}^2}, \quad (1.18)$$

где S_t^2 и t_{cp} – соответственно, дисперсия и среднее время образования карстовых форм, лет² и лет.

Вероятность p_t образования карстовой формы по истечении периода времени равного t годам определяется по формуле:

$$p_t = 1 - 0,5 \left[1 - \tanh \left(\left(\frac{2}{\pi} \right)^{0,5} \frac{t - t_{pr}}{S_{t_{pr}}} \right) \right] \quad (1.19)$$

В дополнение к оценкам по основным показателям поверхностной закарстованности как в зарубежной, так и в отечественной практике широко применяется анализ удаленности при исследовании пространственного распространения карстопроявлений. По анализу взаиморасположения карстовых форм в пространстве возможно предсказывать вероятность образования новых провалов. Как правило, они возникают вблизи или на незначительном удалении от уже существующих групп провальных карстовых воронок [227, 228]. Таким образом, оценка и прогнозирование карстоопасности с применением анализа удаленности основывается на изучении пространственного распределения поверхностных карстопроявлений и их особенности группироваться в карстовые поля.

Используя эту особенность развития карста, рядом исследователей были предложены методические приемы по оценке и прогнозу карстового процесса. Так, методика пространственного прогноза образования новых провалов в карстологической практике англоязычных стран получила название *анализ ближайшего соседства* («nearest neighbor analysis») [261, 262]. В Германии исследования взаиморасположения поверхностных карстовых форм осуществляются с применением двух анализов – *анализа взаимодействия* («interaction analysis») и *анализа направленности* или *ориентации* («orientation analysis») [218]. Аналогом зарубежных подходов в отечественной карстоведческой практике является нормативно закрепленная и рекомендуемая оценка устойчивости закарстованных территорий методом удаленности от ближайшего поверхностного карстопроявления [16, 131-133].

Основной задачей анализа удаленности, применяемого зарубежными исследователями из США, Австралии, Новой Зеландии, Испании и ряда других стран, является установление особенностей пространственного распространения карстопоявлений. Однако, в отличие от отечественной практики, в данном случае основной упор делается на установление собственно самой тенденции карстопоявлений к кластеризации (сгущению), либо же к случайному или дисперсному распространению. Для этого используется специальный показатель – *индекс пространственного распределения R* («nearest neighbor index»), впервые предложенный Р. J. Clark и Ф. С. Evans [197], а впоследствии апробированный Р. Williams [261, 262] применительно к практике карстологических исследований:

$$R = \frac{L_a}{L_e}, \quad (1.20)$$

где L_a и L_e – соответственно, среднее наблюдаемое («mean nearest neighbor distance») и среднее теоретическое («expected mean nearest neighbor distance») расстояния до ближайшей карстовой формы, км.

Показатель L_a определяется по формуле:

$$L_a = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad (1.21)$$

где d_i – расстояние между центром квадрата и i -ой карстовой формой; n – количество карстовых форм.

Показатель L_e рассчитывается так:

$$L_e = \frac{1}{2 \cdot l \cdot \rho}, \quad (1.22)$$

где l – средний периметр всех карстовых форм, км/шт.; ρ – средняя плотность карстовых форм, шт./км².

Показатель R характеризует особенности пространственного распределения карстовых форм. Чем он больше, тем более разрознены карстовые формы друг от друга и наоборот. Индекс ближайшего соседства является ключевым показателем соответствующего анализа, а по его значениям строятся карты его пространственной изменчивости. Анализ удаленности по данной схеме широко применяется в США [207, 245, 264], а также в некоторых европейских странах [219-221, 223].

Среди применяемых в Германии методов оценки опасности карста по характеру взаиморасположения карстовых форм, как было отмечено ранее, выделяются два [151, 218]: *анализ взаимодействия* и *анализ направленности*. Это сугубо математические подходы к оценке карстоопасности, основанные на применении вероятностно-статистического аппарата. Оба анализа базируются на изучении точечной статистики – распределения поверхностных карстовых форм в пространстве.

Анализ взаимодействия использует статистический подход, известный как «семплирование Гиббса». Вероятностная функция плотности распределения n карстовых провалов в границах района площадью G определяется по формуле:

$$f_0(x_1 \dots x_n) = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Phi(|x_i - x_j|) \right\} / Z_0, \quad (1.23)$$

где x – координаты местоположения карстовых провалов; Z_0 – нормированная константа; Φ – функция парного потенциала, определяемая как

$$\Phi(r) = \begin{cases} \infty & ; & r \leq r_0 \\ -v & ; & r_0 < r \leq r_l \\ 0 & ; & r < r_l \end{cases}, \quad (1.24)$$

где r – расстояние между провалами; r_0 – критическое расстояние между провалами, значения меньше которого недопустимы в данной математической модели и приводят к неверным результатам; r_l – расстояние взаимодействия провалов; v – параметр силы взаимодействия между провалами, нулевое значение характерно для отсутствия взаимодействия, значения меньше и/или больше нуля повествуют о репульсивном и/или притягательном взаимодействиях.

Оценка параметров функции Φ может быть получена с применением алгоритма «семплирования Гиббса».

Прогнозирование конкретного местоположения нового провала основывается на применении Марковских процессов и позволяет оценивать вероятность его формирования в определенной точке. Для этого вычисляется *функция вероятностной плотности* h_{n+1} :

$$h_{n+1}(y) = \exp \left(- \sum_{i=1}^n \Phi(|y - y_i|) \right) / z_{n+1}, \quad (1.25)$$

где y – координаты точек пространства, для которых определяется вероятная плотность карстовых провалов; z_{n+1} – нормированная константа.

Точность предсказания нового карстового провала зависит от того, насколько точно эволюция карстового массива подчиняется правилам Марковских процессов, согласно которым наиболее вероятное положение следующего провала будет близко к месту образования предыдущего. Данная модель была апробирована на территории г. Гронинген, где в целом доказала свою состоятельность.

Примерами применения анализ взаимодействия, предложенного немецкими специалистами, могут служить карстологические исследования участка трассы I-70 неподалеку от г. Фредерик в штате Мэриленд, США [265], исследования близ территории г. Гронинген (Нидерланды) [218].

Анализ направленности позволяет оценивать вероятные направления формирования будущих провалов. С его помощью устанавливаются структурно-тектонические условия развития карстового массива, оценивается направленность развития трещиноватости, а вместе с тем и вероятные направления формирования новых провалов. Для этого выбирается интервал расстояний от R_0 до R_1 и все пары провалов, расположенные друг от друга на расстояниях, попадающих в этот интервал, соединяются прямой линией. Границы интервала постепенно изменяются с определенным шагом. В результате по набору соединительных линий выявляются преобладающие их направления, которые и являются направлениями развития трещиноватости.

Анализ направленности, предложенный R. Fritz и D. Stoyan, получил распространение среди специалистов ряда стран [26, 225, 265]. Однако в мировой практике наиболее часто направленность развития карстовых форм определяется по упрощенной методике в результате оценки угла ориентации главной (большей) оси закартированных поверхностных карстопроявлений [226]. Как показали исследования испанских специалистов [225], проведенные в пределах карстового поля La Puebla de Alfinden, расположенного на северо-востоке Испании и приуроченного к долине р. Эбро, результаты анализа направленности, осуществленного по выше описанной методике и упрощенным способом сопоставимы между собой. Они же предложили комплексировать результаты анализа ближайшего соседства, выполненного с применением индекса пространственного распределения, и анализа направленности при зонировании территорий по степени карстоопасности. Прогнозная способность такой модели повышается с ростом тенденции карстовых форм к кластеризации и наличия магистрального направления, в котором происходит формирование новых карстопроявлений.

Отечественный подход к оценке карстоопасности методом удаленности от ближайшего карстопроявления используется не менее широко. Более того, отечественный вариант метода не останавливается только на определении характера взаиморасположения карстовых форм.

Методика И.А. Саваренского [131-133] направлена на оценку плотности их группирования с последующим выходом на нормативный показатель интенсивности провалообразования. Определение устойчивости территории с применением данного подхода сводится к последовательному выполнению нескольких этапов.

На первом этапе строятся вспомогательные карты с нанесением *изолиний удаленности* R от карстопроявлений. Этими изолиниями оконтуриваются *зоны*, в пределы которых попадают две и более карстовые формы. В пределах каждой из зон, образованной той или иной изолинией удаленности определяются: ее площадь S_R , количество попавших в ее пределы поверхностных карстовых форм N_R , частота их попадания P_R , интенсивность провалообразования λ_R , средний диаметр d_R и средняя площадь s_R поверхностных карстопроявлений, а также суммарная площадь Σs_R поверхностных карстопроявлений. Отдельно подобная статистика определяется также для *интервалов удаленности* ΔR – участков, заключенных между двумя соседними зонами. Это: площадь интервала удаленности $S_{\Delta R}$, количество попавших в его пределы поверхностных карстовых форм $N_{\Delta R}$, частота их попадания $P_{\Delta R}$, интенсивность провалообразования $\lambda_{\Delta R}$, средний диаметр $d_{\Delta R}$ и средняя площадь $s_{\Delta R}$ поверхностных карстопроявлений, и суммарная площадь поверхностных карстопроявлений $\Sigma s_{\Delta R}$ в пределах интервала удаленности.

Частота поверхностных карстопроявлений в пределах каждой зоны P_R и каждого интервала удаленности $P_{\Delta R}$ определяется по следующим формулам:

$$P_R = \frac{N_R}{N}, \quad P_{\Delta R} = \frac{N_{\Delta R}}{N}, \quad (1.26)$$

где N – общее количество поверхностных карстопроявлений, шт.

Показатель интенсивности провалообразования определяется по формулам:

$$\lambda_R = \frac{N_R P_R}{t S_R}, \quad \lambda_{\Delta R} = \frac{N_{\Delta R} P_{\Delta R}}{t S_{\Delta R}} \quad (1.27)$$

С.В. Щербаковым и Д.Р. Золотаревым [181] при определении показателя интенсивности провалообразования с применением метода удаленности И.А. Саваренского в числителе предлагается использовать величину $(1 - P)$, вместо предлагаемой автором методики частоты P . Данная величина – $(1 - P)$ – которую предлагается называть *надежностью* зоны или интервала удаленности, наиболее объективно отражает природу карста и вносит дополнительный запас при расчете интенсивности провалообразования, искусственно завышая его значения на удаленностях, превышающих 100 м.

По рассчитанным значениям частоты карстовых форм или интенсивности провалообразования строятся эмпирические кривые их распределения по зонам или интервалам удаленности. Данные зависимости всегда весьма близки к степенной $y = a \cdot e^{b \cdot x}$ и в случае с

интенсивностью провалообразования имеют вид $\lambda = a \cdot e^{b \cdot R}$. Для удобства прогнозирования степенная функция в результате логарифмирования приводится к линейному виду:

$$\lg \lambda = \lg a + b \cdot R \cdot \lg e \Rightarrow \lg \lambda = A + B \cdot R, \text{ где } A = \lg a, B = b \cdot \lg e \quad (1.28)$$

Коэффициенты A и B линейной зависимости $\lg \lambda = A + B \cdot R$ определяются по методу наименьших квадратов с использованием следующих формул:

$$B = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \lg \lambda_i \cdot R_i - \sum_{i=1}^n \lg \lambda_i \cdot \sum_{i=1}^n R_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (R_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n R_i \right)^2}, \quad (1.29)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \lambda_i - B \cdot \sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (1.30)$$

где i – частные значения $\lg \lambda$ и R ; n – количество пар значений λ и R .

С использованием прогнозных уравнений строятся карты изолиний удаленности от зафиксированных проявлений провальных карстовых деформаций, соответствующие границам категорий устойчивости по интенсивности провалообразования.

Поверхностные карстопроявления, как правило, неадекватно отражают размеры подземного закарстования. В ряде случаев провалы над крупными сводами пещер не развиваются, в то время как над незначительной по размерам полостью может начать закладываться свод, ведущий, в конечном счете, к формированию карстового провала. В связи с этим возникает необходимость изучения подземной закарстованности массива при оценке карстоопасности территорий.

В.С. Лукин [95] предлагал сопоставлять масштабы поверхностной внутренней закарстованности массива в результате расчета двух показателей – *коэффициентов внутренней $K_{внутр}$ и поверхностной $K_{пов}$ закарстованности*:

$$K_{внутр} = \frac{V_1}{V + V_1} \cdot 100\%, \quad K_{пов} = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100\%, \quad (1.31)$$

где V_1 – объем подземных карстовых форм, шт.; V – объем карстующейся породы, м³; m_1 – средняя закарстованная мощность толщи, м; m – полная мощность карстующихся пород, м.

По данным В.С. Лукина [95] значения коэффициента внутренней закарстованности для сульфатных пород Предуралья составляют в среднем 2-5%, а в некоторых случаях достигают 10-20%. Коэффициент поверхностной закарстованности изменяется в среднем от 5-10% до 60-70%. Отношение коэффициента поверхностностей закарстованности к внутренней $K_{пов}/K_{внутр}$

В.С. Лукин предлагает рассматривать в качестве критерия карстоопасности и интенсивности провального процесса.

В.Н. Андрейчук [27] при изучении карста рекомендует оценивать *расчетную и потенциальную карстоопасности*. Расчетная карстоопасность определяется по нормативной методике в результате анализа поверхностных карстопроявлений. Оценка потенциальной карстоопасности осуществляется на основании изучения подземных форм карста и механизмов образования провалов над ними.

Детальное изучение и оценка подземной закарстованности массива пород может осуществляться различными способами в зависимости от типов карста. В условиях открытого карста или при наличии относительно небольшой по мощности перекрывающей толщи отложений изучение подземной закарстованности массива, как правило, ведется в ходе прямых спелеологических наблюдений, ввиду наличия широкой сети пещер и гротов, выходящих на дневную поверхность. При этом исследуются конусообразные своды пещер и характер осыпавшегося материала.

Так, определение карстоопасности в местах развития провалов, образованных, в условиях слоистого строения перекрывающей толщи отложений результате постепенного обрушения выше лежащих слоев в своде полости (механизм «органных труб» по классификации В.Н. Андрейчука [27]), ведется путем сопоставления поверхностной и подземной закарстованности, оцениваемой по данным спелеологических исследований. Отношение плотности «органных труб» – потенциальных провалов, – к плотности провальных карстовых воронок, развитых по одноименному механизму служит мерой опасности провалов исследуемой территории. Данный показатель называется *коэффициентом реализации труб* K_{pt} [27]. Для территории сульфатного карста Приуралья он изменяется от 1 до 3 и чем выше значения K_{pt} , тем выше степень потенциальной карстоопасности.

В.П. Костарев [82] по результатам спелеологической съемки предлагает использовать комплекс количественных оценочных показателей потенциальной карстоопасности. Им выделены такие показатели как *показатель пустотности Корбеля* Πn_K , *плотность пещер* Π_c , *густота пещерных ходов* D_c и *удельный объем карстовых пещер* v_c :

$$\Pi n_K = L_c J H, \quad \Pi_n = \frac{n_c}{0,001S}, \quad D_c = \frac{\sum L_c}{S}, \quad v_c = \frac{V_c}{L_c}, \quad (1.32)$$

где L_c – длина пещерной системы, м; J – расстояние между двумя наиболее удаленными точками по перпендикуляру к основной оси пещерной системы, м; H – разница отметок между самой высокой и самой низкой точками пещерной системы, м; n_c – количество пещер, шт.; S – закарстованная площадь, км²; V_c – объем пещерной системы, м³.

В пределах территорий развития покрытого карста изучение подземной закарстованности осуществляется с применением буровых работ, а также в результате комплексирования геофизических методов исследования [3]. В процессе таких исследований более менее точно устанавливаются *высоты (вертикальные мощности) h* подземных карстовых полостей. Их сопоставление с линейными вертикальными размерами пройденных скважинами толщ карстующихся отложений является основой оценки точечной подземной закарстованности в пространстве карстового массива. При этом развитие пустот и полостей в толще карстующихся пород ввиду их недоступности для прямого детального изучения рассматривается как случайная величина [210], в связи с чем, применяемые показатели оценки подземной закарстованности носят вероятностно-статистический характер.

Наиболее простым способом оценки подземной закарстованности по результатам бурения карстологических скважин по равномерной сети является расчет *коэффициента аномальности K_a* , д.е. [82]:

$$K_a = \frac{C_a}{C}, \quad (1.33)$$

где C_a – количество скважин, вскрывших карстовые полости, шт.; C – общее количество скважин, шт.

Для изучения развития полостей в пространстве применимы формулы, применяемые для поверхностных карстовых форм. Например, оценка подземной закарстованности часто осуществляется в результате расчета *площадной плотности карстовых полостей ρ_p* . Ее определение производится, аналогично плотности поверхностных форм карста ρ , только вместо количества карстовых провалов в расчет берется количество полостей n_p , развитых в пределах исследуемой площади S :

$$\rho_p = \frac{n_p}{S} \quad (1.34)$$

Более точная оценка подземной закарстованности по результатам изучения развития полостей, вскрываемых в ходе буровых работ, осуществляется с использованием коэффициентов *линейной закарстованности*, предложенных В.П. Костаревым [82]. Им выделено 3 разновидности коэффициентов – *внутренней K_{lv} , открытой K_{lo} и общей K_l* линейной закарстованности:

$$K_{lv} = \frac{\sum h}{\sum m_0} \cdot 100\%, \quad K_{lo} = \frac{\sum h_o}{\sum m_0} \cdot 100\%, \quad K_l = \frac{\sum h_{II} + \sum (m-l)}{C \cdot m} \cdot 100\%, \quad (1.35)$$

где h – высота полости, м; h_o – высота незаполненной части полости, м; m и m_0 – соответственно, полная и вскрытая скважиной мощность карстующейся толщи пород в точке развития полости, м.

Аналогом коэффициентов линейной закарстованности являются показатели, оценивающие плотность развития карстовых полостей. В.П. Костарев [82] предлагает оценивать *линейную* Π_L , *площадную* Π_S и *объемную* Π_V *плотности* карстовых полостей:

$$\Pi_L = \frac{n_n}{0,01 \cdot L}, \quad \Pi_S = \frac{n_n}{10^{-4} \cdot S}, \quad \Pi_V = \frac{n_n}{10^{-6} \cdot V}, \quad (1.36)$$

где n_n – количество полостей, шт.; L – длина линейного участка, в пределах которого развиты карстовые полости, м; S – площадь, в пределах которой локализованы карстовые полости, м²; V – объем карстующегося массива пород, в пределах которого локализованы карстовые полости, м³.

Некоторые зарубежные исследователи [227] справедливо говорят о неоднозначности многих оценок устойчивости территорий, полученных по данным изучения карстовых форм, в частности оценок по показателю интенсивности образования провалов. Это связано с рядом причин. Во-первых, такие оценки требуют достаточного объема и качества фактических данных, как об имеющихся карстовых формах, так и о характере их образования (времени образования, типах деформаций, их изначальной морфометрии) на исследуемой территории, что не всегда возможно. Во-вторых, оценки по конкретным карстовым формам носят вероятностно-статистический характер, следовательно, прогнозы с их использованием, по мнению некоторых авторов, относятся к группе неподтверждаемых гипотез [227]. В-третьих, данная оценка по существу опирается на принцип униформизма, т.к. прогноз будущей карстовой активности осуществляется по уже образованным карстовым формам исходя из предположения, что дальнейшее развитие карстового массива будет мало отличаться от предыдущих его стадий. Согласно последнему утверждению, недоучет эволюционного характера развития карстового массива может приводить к весьма грубым ошибкам. Принцип униформизма далеко не всегда выполняется в случае исследования карста и интенсивность провалообразования в будущем может изменяться в различных направлениях. Так, А. Вахтуаревич [193] сравнивая карты плотности распространения древних и молодых (образованных в течение последних 30 лет) провальных карстовых воронок, установил, что они практически не коррелируют между собой. Исходя из выше сказанного, при изучении активности карста следует опираться не только на данные о характерной закарстованности района, но и исследовать условия его развития, выражаемые рядом факторов (показателей) строения территории.

На характерные недостатки применения показателя интенсивности провалообразования при классификации устойчивости территорий указывает Н.Х. Логинов [94]. К таковым он относит неполный учет природных условий территории, а также подчиненную роль подземных форм карста, которые зачастую являются предвестниками опасности.

Немецкие ученые [218] также помимо непосредственного расчета показателей закарстованности указывают на обязательную необходимость их верификации, сравнении математических результатов оценки устойчивости с геологическим строением территории, гидрогеологическими и тектоническими условиями. Они отмечают, что математический аппарат только с четко определенной геологической подосновой формирует целостную систему для любых оценочных построений в карстоведении.

Стоит заметить, что подобные выводы были сделаны еще на заре отечественного инженерного карстоведения. Так, З.А. Макеев в 1947 г., ссылаясь на И.В. Попова, отмечал, что в основе выделения категорий устойчивости площадей должны быть результаты изучения таких природных факторов, как характер рельефа, геологическая структура, грунтовые условия, гидрогеологические условия, современные физико-географические процессы. Кроме того, он указывал, что можно рекомендовать выделение инженерно-геологических участков только по признаку закарстованности, но такие оценки не могут считаться инженерно-геологическими без учета природных факторов в локальном и региональном аспектах. В отечественной изыскательской практике оценки устойчивости территорий их природное строение учитывается при проведении предварительного районирования по качественным признакам (тип и литология карста, гидрогеологические условия, структурно-тектоническое строение района и т.д.) [183]. Однако количественный учет показателей природного строения выполняется в исключительных случаях.

1.2. Оценка карстоопасности по отдельным факторам природных условий

В некоторых случаях предварительные заключения о характере карстоопасности выстраиваются по анализу отдельных факторов в результате установления их влияния на активность развития карста, а иногда и на интенсивность его проявления. Согласно В.Н. Катаеву [68] в качестве признаков, позволяющих оценить активность и опасность какого-либо процесса, используют те его факторы, определенное сочетание которых обуславливает степень активности и частоту проявлений процесса на единице площади или объема исследуемого массива. Результаты научных исследований, выполненных в 1991 г. большим коллективом карстоведов в рамках государственной научно-технической программы «Безопасность», позволили разделить факторы на три группы в зависимости от масштабного уровня [68]:

- *Группа глобальных факторов* – поля космического и земного происхождения, а также общие направления изменения природной среды и климата Земного шара;

- *Группа региональных факторов* – геотектоническая обстановка, вертикальные геотектонические движения, климат и палеоклимат, предшествующие континентальные этапы развития анализируемой территории;

- *Группа локальных факторов* – геоморфологические, структурно-геоморфологические, геолого-структурные и гидрогеологические факторы, характеризующие строение карстового массива.

Наиболее полно в настоящее время исследовано влияние глобальных и региональных факторов, которые формируют общий тренд или направленность карстового процесса, в зависимости от которой он может быть затухающим или наоборот активно развиваться. Например, в настоящее время установлена теснейшая связь развития карста с климатом [5, 151]. Известно, что усиление процесса карстообразования происходит по мере перехода от зон с сухим климатом к зонам субтропического и тропического климата. Интенсивность карстообразования непосредственно зависит от количества атмосферных осадков, выпадающих на территории. В среднем с увеличением годовой суммы осадков на 100 мм интенсивность карстовой денудации возрастает: на возвышенностях и в предгорьях – на $5 \text{ м}^3/\text{км}^2$, в высокогорьях – на $8 \text{ м}^3/\text{км}^2$ в год [120, 250].

Характерная связь развития карста установлена в зависимости от геотектонической обстановки. В сейсмических районах активизация карстового процесса может быть вызвана в результате землетрясений [231]. Например, 24% провалов (104 шт.) на территории Италии образовались вследствие землетрясений [248].

С инженерной точки зрения наибольший интерес представляет исследование группы локальных факторов, действие которых оказывает непосредственное влияние на устойчивость системы «карст-сооружение». Данная группа факторов характеризует внутренние условия развития карстового массива, которые в свою очередь зависят от внешних воздействий (глобальных и региональных факторов) в опосредованной форме характеризую их.

В.Н. Катаевым [68] предложен перечень естественных признаков-факторов локальной группы, анализ которых должен быть положен в основу карстологических исследований в пределах любой закарстованной территории. Рассматриваемый набор факторов рассматривается им с позиции геоморфологических, геолого-структурных, структурно-геоморфологических и гидрогеологических условий [73]:

- Среди *геоморфологических факторов* исследуется уклон земной поверхности, глубина вреза современных долин в растворимые породы, тип речных террас, ориентировка речной долины (по отношению к структурам напластования, тектоническим нарушениям, складчатым структурам), элементы древнего рельефа (древние долины и эрозионные врезы, наличие излучин).

- *Геолого-структурные особенности* могут быть исследованы в результате изучения литологического состава пород (величина растворимости, содержание и состав нерастворимых примесей), генезиса и фациального состава карстующихся отложений. Немаловажное влияние оказывает мощность и структурно-текстурные особенности (величина первичной пористости, тип цемента и характер слоистости) карстующихся и перекрывающих отложений, состав и сплошность покрова нерастворимых пород и разделяющих пластов, пространственное положение контактов пород разной растворимости, контактов растворимых и нерастворимых пород.

- В *структурно-тектоническом плане* исследованию подвергаются тектонические нарушения (порядок, мощность зон повышенной трещиноватости, интенсивность трещиноватости, пространственная ориентировка трещин), положительные складчатые структуры (порядок, величина, ориентировка), трещиноватость массива (интенсивность, раскрытость, прерывистость трещинной решетки, наличие протяженных трещин).

- В *гидрогеологическом отношении* рассматриваются условия питания и разгрузки, характер движения и уровенный режим подземных вод в растворимых породах в сфере дренирующего влияния речной долины и в перекрывающих отложениях (величина инфильтрационного питания, уклоны уровня подземных вод, амплитуды сезонных колебаний уровня, длина путей фильтрации, направления движения, минерализация, химический состав и температура подземных вод, наличие органических кислот).

Настоящий обзор посвящен рассмотрению основных наиболее часто применяемых в карстологической практике факторов (показателей) природных условий при исследовании карстовых массивов на локальном масштабном уровне. Вся их совокупность разделена на 5 групп, характеризующих природные условия с позиции: структурно-тектонического (1) и геологического (2) строения, гидрогеологических (3), геоморфологических (4) и инженерно-геологических (5) условий.

1.2.1. Структурно-тектоническое строение

Современная инженерная геодинамика в качестве ключевого условия развития экзогенных природных процессов рассматривает структурно-тектонический план территории. Сеть разрывных нарушений различных порядков, пронизывающих разновозрастные слои отложений, а также характер неотектонических движений блоковых структур является основным возбудителем активности протекания всех опасных геологических процессов, в том числе и карстовых. Так, еще Д.С. Соколовым, Г.А. Максимовичем и А.Г. Лыкошиным были сформулированы основные общие закономерности развития карста [151], среди которых ими

выделялись: 1) связь закарстованности с тектонической трещиной водопроницаемостью пород и 2) ослабление закарстованности массива с глубиной вследствие снижения трещинной водопроницаемости, скоростей движения и растворяющей способности подземных вод.

Тесная связь закарстованных зон с тектоническими поднятиями и новейшими положительными движениями прослеживается почти во всех карстовых областях. Новейшие движения определяют характер, степень и направление развития современных карстовых процессов, поэтому изучение неотектоники района исследований может оказаться весьма полезным при выявлении участков, благоприятных для карстообразования [4].

Роль структурно-тектонической трещиноватости в развитии карстового массива подробно рассмотрел В.Н. Катаев [69]. Им были выделены основные структурные элементы, слагающие карстовый массив, и масштабные уровни их организации. Так, размеры структурных элементов массива, влияющих на развитие и морфологию карста, изменяются в широком диапазоне: от десятков микронов до десятков километров. Связано это с генетическими особенностями процесса, начинающегося от микротрещин и микропор, различимых при большом увеличении, а впоследствии контролируемого в своем развитии элементами региональных дислокаций [69].

Масштабный диапазон размеров структурных элементов В.Н. Катаев [69] делит на семь интервалов-уровней, каждому из которых соответствует свой комплекс методов изучения, сформировавшийся по результатам многолетних практических исследований закарстованных территорий. Это атомарный (I), микронный (II), микроблоковый (III), блоковый (IV), локальный (V), региональный (VI) и глобальный (VII) уровни. Предложенная иерархия структурных элементов принципиально отражает качественное развитие карстового массива от I до VII уровня. Эволюционные изменения карстового массива в ходе его развития приводят к появлению новых структурных элементов большего масштаба, частично или полно сохраняя при этом элементы предыдущих этапов. Таким образом, получается целостная непрерывная картина развития массива с учетом фрактальности отдельных его уровней.

Предложенное В.Н. Катаевым [69] деление учитывает особенности свойств геологических тел каждого уровня с характерным влиянием на них закономерностей и явлений присущих для предыдущего уровня. В то же время свойства геологических тел настоящего уровня контролирует распределение структурных элементов в геологических телах последующего уровня. Как справедливо указывает В.Н. Катаев, при изучении распределения карстопроявлений в инженерных целях в пределах локальной тектонической структуры (V уровень) необходимо и целесообразно исследовать структурные элементы и явления, контролируемые ими, на блоковом уровне (IV) с учетом региональной ситуации (VI уровень), проявляющейся через структурно-тектонические, гидрогеологические, геологические условия и т.д. При этом состояние пород на первых трех уровнях ввиду особенностей решаемой инженерной задачи детализировать не имеет

смысла и оно принимается квазиизотропным. Таким образом, трещиноватость является обобщающим элементом структуры массива, присутствующим во всех предыдущих «структурных уровнях» [69]. Именно изучение тектонической трещиноватости часто дает возможность объективно оценить инженерно-геологические условия карстового района.

Морфология, генезис и возраст тектонических структур, их связь с рельефом и гидрогеологическими особенностями территории определяется структурным планом данной территории. Различные формы современного карстового рельефа разных таксономических рангов (провальные воронки, оседания, лога и т.д.) определяются неотектонической структурой, теми тектоническими движениями, которые начались в олигоцене – раннем миоцене и продолжают до настоящего времени.

А.И. Печеркин и Г.Б. Болотов [120] при анализе формирования рельефа карстовых массивов выделяют две его принципиальные разновидности: *консонантный* и *диссонантный*. Впервые данные термины в отношении рельефа карстовых массивов употребил Г.А. Максимович [101]. Консонантный рельеф карстовых массивов характеризуется выходом на дневную поверхность карстующихся пород и прямым выражением их в рельефе местности. Диссонантный карстовый массив, напротив, характеризуется инверсионным сочетанием рельефа поверхности земли и поверхности карстующихся пород, залегающих на относительной глубине.

В зависимости от эволюционного этапа карстовый массив может находиться в состоянии равновесия (установившегося режима), быть консервативным (захороненным) или активным (приповерхностный, активный). Каждое из конкретных состояний массива определяется многими факторами и параметрами слагающих карстовый массив элементов, первостепенное значение среди которых играет, несомненно, тектонический режим территории, выводящий карстующиеся породы в ту или иную гидродинамическую зону [69].

Развитие любой карстовой системы подчиняется закону ритмичности с учетом всеобщего тренда развития карстового процесса, направленного на постепенное разрушение карстующейся толщи и деградацию карстового массива. Ритмичность выражается в постепенных переходах от массива консонантного к массиву диссонантному и наоборот. Контролируется ход этого развития тектонической активностью территории, а именно интенсивностью вертикальных и субвертикальных неотектонических движений земной коры. В результате в массиве происходит перераспределение тектонических усилий, активизируются старые и закладываются все новые зоны повышенных напряжений, в пределах которых формируются дизъюнктивные нарушения различных порядков, определяющие направление процесса карстообразования и особенности рельефа поверхности земли. Тектоническое поднятие территории в самом общем случае ведет к формированию консонантного карстового массива вследствие комплексного воздействия на породы процессов денудации. Соответственно, понижение территории формирует

благоприятные условия для аккумуляции и осадконакопления и формирования на этом фоне диссонантного карстового массива.

В пределах любого карстового массива выделяются три основные разновидности элементов подземного карстового рельефа – карстовые депрессии или котловины, карстовые останцы и карстовые седловины. Постепенное разрушение и растворение карстующихся отложений поверхностными и подземными водами, наиболее интенсивно проходящее в пределах ослабленных трещиноватых зон карстового массива на фоне протекания других экзогенных геологических процессов, таких как перенос, перераспределение вещества и его аккумуляция, выветривание приводит к формированию *карстовых депрессий*. Они характеризуются пониженным гипсометрическим положением в рельефе массива. Наиболее крепкие и целые участки коренных карстующихся пород, со слабо развитой трещиноватостью и возвышенным положением в теле карстового массива называются *карстовыми останцами*. Наконец, промежуточные участки, приуроченные к межостанцовому пространству, относятся к *карстовым седловинам* или *межостанцовым седловинам*. Эти разновидности элементов рельефа характерны как для консонантных карстовых массивов, где теоретически они выражены наиболее четко, так и для диссонантных карстовых массивов. Более подробно о роли структурно-тектонических факторов при зонировании карстовых массивов изложено в работах пермских исследователей-карстоведов [69, 119, 120, 122, 234].

Наиболее безопасные участки на поверхности земли в отношении карстообразования и протекания карстово-суффозионных процессов в строении подземного карстового рельефа представлены останцами коренных карстующихся пород. Межостанцовые депрессии характеризуются повышенной трещиноватой расчлененностью и широким развитием суффозионных процессов в карстово-обвальной толще. Они же являются наиболее опасными участками [30]. Согласно В.С. Лукину [96] тесная связь между подземными формами карста и карстовым рельефом позволяет с успехом применять методы структурного анализа для оконтуривания закарстованных зон.

Влияние структурной тектоники в условиях мощной толщи перекрывающих отложений (диссонантный массив) отражается конседиментационными деформациями, которые сопровождаются изменениями состава, структуры, состояния и мощности грунтов покровной толщи. В условиях открытого карста (консонантный массив) приразломные зоны проявляются на поверхности в форме достаточно резких черт рельефа. Например, на территории Малайзии в районах развития открытого карста отчетливо прослеживаются линейные карстовые рвы в известняках. Эти углубления в породе связаны с тектонической трещиноватостью и прослеживаются вдоль систем трещин [255].

Изучая распределение закарстованности в пределах платформенных положительных структур, А.И. Печеркиным [119] было установлено, что на брахиантиклиналях максимальная закарстованность развита на участках, примыкающих к осям структуры, а при наличии блоковой тектоники, наоборот, максимально закарстованы периферийные приразломные участки, тогда как центральные части блоков остаются закарстованными слабо. Вместе с тем закарстованность увеличивается по мере возрастания амплитуды поднятия структур и возрастания угла наклона их крыльев, а ее максимумы приурочены к осложняющим складки поднятиям более высокого порядка. Эта же мысль отражена в работах некоторых других исследователей [4, 69].

Проявление узких субвертикальных линейных зон трещинно-разрывных и флексурно-разрывных структур осадочного чехла и фундамента в строении земной поверхности обусловлено возрождением блоковых движений в современный тектонический этап развития земной коры. Наблюдаемое положение линейных трещинно-разрывных и площадных блоковых структур осадочного чехла, как правило, напрямую отражается в неотектонической составляющей приповерхностной структуры.

Общепризнанным считается, что дизъюнктивные деформации глубоких слоев литосферы, распространяясь вверх, преобразуются в соответствии со структурами и литолого-петрографическими неоднородностями более высоких слоев и достигают поверхности в виде более или менее широких ореолов, представленных зонами увеличенной трещиноватости и проницаемости пород. При прочих равных условиях, чем больше глубина заложения деформации, тем в более рассеянном виде, более широким ореолом она проявлена на поверхности [80]. Таким образом, проявление более древних погребенных структур осадочного чехла на поверхности обусловлено *унаследованным развитием* более молодых деформаций земной коры.

Зоны трещинно-разрывных нарушений, проявляющиеся в региональном плане и имеющие унаследованный характер, являются наиболее ослабленными участками массива, в границах их распространения создаются оптимальные условия для развития и активизации карстового процесса [65, 157, 233]. В некоторых случаях локальные неотектонические формы могут быть несогласными по отношению к более древним структурам, являться новообразованными или наложенными на них. Такие деформации носят местный характер и накладываются на глобальные структурно-тектонические элементы и, в конечном счете, подчиняются им. Согласно В.Н. Андрейчуку [27] карстовые полости с характерными куполообразными сводами, локализованные в массиве, к которому приурочена пещера Золушка (Украина), как правило, закладываются в местах развития гидрогеологически активных трещин, зачастую не совпадающими с региональным структурным планом. По этой сети трещин происходит инфильтрация поверхностных вод и перетекание грунтовых вод в нижележащие горизонты.

Тектоническая трещиноватость карстового массива является определяющим фактором развития локальной трещиноватости пород и карстопроявлений [119]. Изучение взаимосвязи разрывных нарушений и трещиноватости пород показало, что интенсивность трещиноватости в приразломной зоне резко увеличивается по сравнению с удаленными участками. С этим связано наличие большого количества карстовых провалов и полостей, как правило, незначительных размеров в зонах, непосредственно примыкающих к разломам [3, 119, 151]. Об этом же свидетельствует В.П. Будков и др. [31]. При изучении бортов карьера они отмечают, что наибольшая закарстованность характерна для участков, локализованных в непосредственной близости от картируемых трещин.

По мере удаления от разрывов, преобладают пустые трещины, по которым часто развиваются крупные подземные пустоты. Интенсивность образования карстовых форм на значительном удалении от тектонических разломов, как правило, невелика [4]. По данным R.L. Ни и др. [231] на территории г. Таншань (Китай) в непосредственной близости от разрывных нарушений часто формируются суффозионно-карстовые провалы, что связано с нарушением структуры и ухудшением свойств отложений покровной толщи.

Наиболее тектонически ослабленными являются геодинамические зоны и участки на границах неотектонических блоковых структур, и в пределах их осевых линий, где наблюдается наибольшее сгущение и пересечение мегатрещин, отмечается наибольшая закарстованность, расчлененность рельефа и в целом повышенная неотектоническая активность. Согласно [4] наибольшее количество локальных трещин наблюдается в зонах поперечных и продольных разрывов по отношению к главной оси разлома. Эти зоны характеризуются обычно очень маленьким зиянием трещин, вследствие чего степень закарстованности здесь относительно высокая, однако линейные размеры подземных и поверхностных карстовых форм, как правило, незначительны. О роли сгущения трещин и участков их пересечения в развитии карста говорят американские исследователи [236].

Региональные структурные трещины и разломы являются не только ослабленными зонами в прямом смысле этого слова. В их пределах происходит магистральная разгрузка поверхностного стока и значительное увеличение подземного, осуществляется массоперенос газово-жидких флюидов [32, 34, 63, 65]. При определенных условиях глубинные высокоминерализованные воды и газы могут вызвать резкую активизацию карстового процесса [230, 248].

Резюмируя выше сказанное, зоны, приуроченные к тектоническим разломам, являются наиболее опасными в отношении провалообразования, а само развитие карстового процесса обусловлено *направленностью современных неотектонических движений*. Инженерами карстоведами пермской школы был предложен комплекс оценочных показателей структурно-

тектонического строения карстовых массивов [119]. Основными оценочными показателями структурной и разрывной тектоники служат: *амплитуда перемещения центральных частей локальных тектонических структур H* и *углы наклона их крыльев α* , *линейная плотность L_m* и *количество пересечений тектонических трещин M_m* , *тектоническая блочность B* и *удаленность от разломов R_m* . В.Н. Дублянским, В.И. Клименко и А.Н. Михайловым [52] были предложены еще два показателя – *угол падения карстующихся пород α_k* и *количество тектонических трещин N_m* .

Показатели структурной тектоники – амплитуда перемещения H , м, углы наклона крыльев тектонических структур α и падения карстующихся пород α_k , устанавливаются по данным бурения структурных скважин, геофизических сейсмических исследований, геодезических наблюдений за вертикальными перемещениями реперов, а также по результатам математического моделирования напряжений, возникающих в толще массива.

Комплексированием различных методов исследования (структурное бурение, геофизические и геохимические методы поиска, анализ аэрофотоматериалов и др.) устанавливаются узкие субвертикальные линейные зоны трещинно-разрывных и флексурно-разрывных структур осадочного чехла и фундамента к, которым приурочены трещинные зоны. Показатели количества тектонических трещин N_m , линейной плотности L_m , и количества пересечений M_m разрывных нарушений, а также тектонической блочности B определяются в площадном отношении по формулам:

$$N_m = \frac{N}{S}, \quad L_m = \frac{L}{S}, \quad M_m = \frac{M}{S}, \quad B = \frac{S_B}{N_B}, \quad (1.37)$$

где N – количество тектонических трещин, шт.; L – протяженность тектонических трещин, м; M – количество пересечений тектонических трещин, шт.; S – площадь, в пределах которой локализованы тектонические трещины, км²; S_B – суммарная площадь блоков, развитых в пределах исследуемого участка, км²; N_B – количество блоков, развитых в пределах исследуемого участка, шт.

Блоки, участвующие в расчете показателя B , получаются в результате пересечения трещин друг с другом.

Удаленность от разломов R_m , м, устанавливается в результате построения буферных зон, равноудаленных от своей центральной оси, представленной непосредственно разломом.

Наиболее карстоопасными являются участки, приуроченные к осевым частям положительных структур, испытывающим наибольшие поднятия и характеризующимся значительными углами наклона их крыльев, а также значительными углами падения карстующихся пород. Карстоопасность увеличивается в пределах участков, характеризующихся повышенным числом тектонических трещин на единицу площади, средними значениями их

линейной плотности и количества пересечений, а также относительно небольшими значениями показателя тектонической блочности. Локализация площадки на незначительном удалении (до 1 км) от разлома также относится к участкам с повышенной карстовой опасностью. В пределах площадей, удовлетворяющих выше перечисленным условиям, следует ожидать максимального развития подземных полостей и интенсивного образования провалов значительных размеров.

При непосредственном изучении локальной трещиноватости пород карстового массива по обнажениям или в ходе спелеологических исследований характер карстоопасности можно количественно оценить, оперируя показателями *объемной плотности трещин* T и *величиной раскрытия трещин* [52]. Величина раскрытия трещин устанавливается в ходе прямых замеров в полевых условиях. Показатель T определяется расчетным способом на основе замеров количества трещин на 1 погонный метр обнажения по трем взаимно перпендикулярным направлениям (T_x, T_y, T_z) по формуле:

$$T = \frac{(T_x + T_y + T_z) \cdot (T_x^2 + T_y^2 + T_z^2)}{2} \quad (1.38)$$

Повышенные значения обоих этих показателей свидетельствуют об увеличении степени карстоопасности в исследуемой точке массива.

В последние десятилетия при картировании и выделении структурно-тектонических зон и элементов разрывной тектоники все чаще применяются методы *структурного дешифрирования* и *линеamentного анализа*. Под структурным дешифрированием понимается выявление и картирование по результатам дистанционного зондирования земли особенностей неотектонического и глубинного строения изучаемой территории. По результатам структурного дешифрирования выделяются линейные (линеаменты) и, реже, кольцевые образования. Анализ выделенных линеamentов позволяет оценивать структурно-тектоническую обстановку в пределах исследуемой территории.

Дистанционное зондирование заключается в применении комплекса методов по фотографированию, просвечиванию, сканированию поверхности земли. В настоящее время различные материалы дистанционных зондирований, выполненных в разные годы на различных масштабных уровнях, находятся в широком доступе в сети Интернет. Детальные снимки с 5 метровым разрешением позволяют выделять более мелкие трещинные структуры и разломы, в то время как линеаменты, трассирующие глобальные структуры, дешифрируются только по мелкомасштабным снимкам с 300, 500 и 1000 метровым разрешениями [33].

Б.С. Бусыгин и С.Л. Никулин [33] в качестве основы для дешифрирования линеamentов предлагают использовать данные снимков рельефа, получаемые со спутников TERRA MODIS и SPOT-4. В.М. Бесстрашнов и др. [28] рекомендует применение лазерного сканирования при

выявлении линейных элементов, маркирующих трещинные зоны и разломы разных порядков. Преимущество такого метода заключается в том, что съемка осуществляется в крупном масштабе (до 1:2000) и позволяет получать информацию без помех от растительности и лесов. Лазерное сканирование производится при помощи аэросъемки. Наиболее простым способ для дешифрирования разномасштабных линеаментов является использование цифровых моделей рельефа (Etopo и SRTM), топографических карт и космоснимков земной поверхности различной детальности, размещенных на общедоступных ресурсах (Google, Kosmosnimki, BingMaps, Bird's Eye и др.).

Дешифрирование и трассирование прямолинейных линеаментов производится по комплексу геоморфологических и ландшафтных (почвенно-геоботанических) индикаторов. Основой для их выделения служит совокупность линейных геоморфологических элементов рельефа и ландшафта в виде прямолинейных отрезков русел рек, оврагов, балок, берегов озер, полос растительности, болот, которые отражают глубинные разломы, разрывы, трещины и другие тектонические нарушения в осадочном чехле. Это обстоятельство связано, прежде всего, с тем, что эрозионно-денудационные процессы интенсивнее всего развиваются в «ослабленных» зонах по линиям разрывов и повышенной трещиноватости пород [4].

Как указывают Б.С. Бусыгин и С.Л. Никулин [33] дешифрируемые линеаменты в 80% являются тектоническими нарушениями осадочного чехла. Повышение процента точности совпадения достигается в результате применения машинных алгоритмов обработки снимков на ранних стадиях дешифрирования. Это позволяет исключить субъективный фактор, неизбежно присутствующий при ручном дешифрировании. В настоящее время существуют комплексные программные решения для автоматизации процесса дешифрирования линеаментов (Lineament, LESSA, PCI Geomatica и др.). Однако, как отмечают турецкие специалисты [238] результаты автоматизированного выделения линеаментов, зачастую приводят к раздробленному их виду, требующему, в конечном счете, их ручной корректировки.

Обработка результатов дешифрирования линеаментов заключается в проведении морфоструктурного и линеаментно-блокового анализов, сводящихся к расчету выше рассмотренных показателей разрывной тектоники, применяемых при исследовании тектонических трещин (L_m , M_m , B , R_m).

Линеаментный анализ применяется при решении карстологических задач с 1970-1980-х гг. Наиболее активное развитие он получил за рубежом. Например, в США линеаментный анализ является стандартным методом исследования при установлении влияния региональных и локальных разрывных нарушений на активность карстового процесса и гидродинамики карстовых горизонтов [229, 239, 260]. К сожалению, применение линеаментного анализа в

практике отечественного инженерного карстоведения не имеет широкого распространения и связано, главным образом, с исследованиями пермских ученых [60, 62, 70].

1.2.2. Геологическое строение

Связь закарстованности с особенностями геологического строения и геологической историей района является одной из основных предпосылок развития карста [151]. Условия залегания горных пород, а именно пространственное соотношение растворимых и нерастворимых прослоев, их мощность и углы залегания определяют морфологию карста, распределение форм на локальном уровне [69].

Изучение геологических условий играет определяющую роль в комплексе карстологических исследований. Основными факторами, обуславливающими распространение и морфогенез карста, являются: 1) вещественный состав растворимой породы; 2) ее текстурно-структурные особенности; 3) содержание и состав нерастворимого остатка; 4) литологическое строение разреза карстующейся толщи; 5) состав, строение, мощность, генезис и возраст покровных пород [4].

Первостепенным фактором геологического строения, предопределяющим интенсивность развития карста, следует считать *вещественный состав карстующихся отложений*. Согласно Г.А. Максимовичу [102] в ходе многолетних исследований по растворимости основных карстующихся пород развитых в Предуралье было установлено, что соотношение растворимости известняков, гипсов и каменной соли в дистиллированной воде в г/дм³ составляет 0,2:2,0:328 или 1:10:1640. Г. Адерхолд [26] указывает несколько иную пропорцию растворимости. Согласно ее данным растворимость карбонатных, сульфатных и хлоридных пород находится в примерном соотношении 10000:100:1. Такой разброс объясняется тем, что интенсивность карстования зависит не только от вида карстующихся пород, но и от их химического состава, в частности от наличия слабо растворимых примесей. Последнее утверждение доказывается в [3] путем рассмотрения растворимости разновозрастных известняков.

В условиях карбонатного карста растворение происходит достаточно медленно, вследствие чего образование полостей и, как следствие, провалов носит также замедленный характер. Кроме того, в таких условиях часто отмечается относительная прочность и устойчивость кровли полостей к обрушению. В условиях хлоридного карста полости образуются достаточно редко, а растворение носит площадной характер. Этим обусловлено широкое наличие мульд оседания в районах развития соляного карста. Максимальная интенсивность карстового процесса, а вместе с

тем и опасность его проявления в форме полостей и провалов характерна для территорий развития сульфатного карста [26].

Одними из первых предложенных и в последующем активно используемых показателей активности карстового процесса в зависимости от вещественного состава пород, а вместе с тем и оценок его опасности в рамках отдельных карстовых массивов являются *интенсивность химической карстовой денудации D* и *интенсивность развития карста A* .

Показатель карстовой денудации предложен и наиболее часто применяется зарубежными исследователями [250]. Существует несколько подходов его оценке (формулы Пулины, Корбеля, Уильямса и др.). Его физический смысл заключается в объеме карстующейся породы или толщине линейного слоя, ежегодно выносимых с определенной площади карстового массива ($\text{м}^3/\text{км}^2 \cdot \text{год}$, $\text{мкм}/\text{год}$).

В отечественной практике более прижился показатель *интенсивность развития карста A* , введенный Н.В. Родионовым [126]:

$$A = \frac{v}{V} \cdot 100\%, \quad (1.39)$$

где v – объем растворенной породы, выносимой из карстового массива, м^3 ; V – общий объем карстующихся пород, м^3 .

Данный показатель вычисляется за определенный промежуток времени. Расчеты показателя интенсивности развития карста для различных территорий и районов СССР [36, 101, 103] позволили систематизировать данные по активности карста в различных условиях и создать классификационные схемы по этому показателю. Так, для закарстованных территорий Пермского края и ряда участков в пределах республики Башкортостан этот показатель был рассчитан за тысячелетие. В результате была составлена классификация активности карста с выделением 4 классов, каждый из которых характеризуется определенной степенью опасности.

Вторым немаловажным фактором геологического строения является изучение толщ разновозрастных отложений, слагающих карстовый массив. В практике инженерного карстоведения оценка геологического строения и его влияния на закарстованность территории часто осуществляются в результате исследования *перекрывающей (покровной) толщи отложений* и подстилающей ее *толщи карстующихся пород*. При этом основное внимание уделяется параметрическим размерам толщ, строению, генезису и составу отложений.

Рассмотрение геологического строения карстового массива сопровождается разделением его на отдельные элементные блоки, характеризующиеся схожестью и общностью строения. Процесс разделения карстового массива на отдельные таксонометрические единицы в инженерном карстоведении получил название *типизации геологического строения* или

типизации разреза. Существует много различных подходов к выделению различных типов геологического строения, в которые закладываются различные признаки, характеризующие массив [38, 49, 77]. В наиболее общем виде типизация геологического строения может быть осуществлена по отсутствию (тип I) или наличию перекрывающих отложений (тип II). Дальнейшее подразделение выделенных типов целесообразно осуществлять в зависимости от возраста, генезиса и характера отложений, слагающих покровную толщу, в результате чего выделяются отдельные подтипы. Еще более глубокая типизация заключается в последующем дроблении подтипов с учетом строения, состава и состояния слагающих их пород, которые, как правило, разнятся в широких пределах в зависимости от территории исследования.

Каждый отдельный тип разреза характеризуется определенными особенностями протекания карстового процесса, различной степенью его активности, а вместе с тем и карстоопасности. Характеристика карстоопасности в рамках типов разреза обычно дается по качественным критериям, а в некоторых случаях, при наличии достаточных сведений о карстопроявлениях, закартированных в пределах участков представленных одним типом геологического строения, может быть дана количественная характеристика карстоопасности по различным показателям, характеризующим морфометрию и особенности пространственно-временного развития карстовых форм [76, 77, 184].

Основными исследуемыми количественными параметрами геологического строения карстового массива являются *мощность толщи карстующихся отложений, общая мощность покровной толщи*, зачастую совпадающая с *глубиной залегания кровли карстующихся пород*, а также *мощности и глубины залегания кровли отдельных прослоев*, слагающих толщи карстующихся и покровных отложений. В ряде случаев вместо глубин исследуются альтитуды (абсолютные отметки) положения соответствующих границ. Строение, генезис и состав отложений, как правило, характеризуется качественным способом.

В настоящее время установленным фактом является то, что с возрастанием *мощности карстующихся пород* интенсивность карстообразования также возрастает [26, 27, 56, 77, 146, 151]. Это проявляется как в развитии крупной сети подземных полостей, так и в увеличении провальных явлений на поверхности.

Общей закономерностью характерной для всех карстовых массивов является обычно наблюдаемое снижение закарстованности с глубиной [5, 56]. В частности тенденция к снижению интенсивности провалообразования наблюдается с погружением карстующихся пород на все большие глубины. Например, большинство провалов (77%) на территории Земли Гессен, Германия, приурочено к площадям развития неглубокого карста (местами открытого). Оставшаяся часть провалов локализована в пределах участков развития покрытого глубокого карста [26]. Однако в некоторых случаях наблюдаются отклонения от данной зависимости,

вызванные усилением действия факторов иной природы. Например, 30% всех карстовых провалов в Италии приурочено к участкам, характеризующимся достаточно глубоким залеганием коренных карстующихся пород (более 100 м) [248].

В целом *глубина залегания кровли карстующихся отложений*, выражаемая через *общую мощность покровной толщи* является наиболее весомым показателем геологического строения. Отражая собой одно из основных условий развития карста, выделенных Д.С. Соколовым [137], эта характеристика во многом предопределяет степень активности карстового процесса. При районировании закарстованных территорий по степени карстоопасности в зависимости от глубины положения кровли карстующихся отложений в условиях недостаточной карстологической изученности поверхностных и подземных карстовых форм, зачастую принимаются решения о целесообразности отнесения территории к определенной категории устойчивости.

Большинство отечественных и зарубежных исследователей отмечают прямую зависимость между мощностью покровных отложений и интенсивностью развития карста [66, 90, 98, 76, 77, 106, 137, 226, 227, 231, 236, 237, 254, 263-265].

Характерным примером влияния мощности покровной толщи отложений на интенсивность провалообразования служат результаты сопоставления плотности распространения молодых и древних провальных карстовых воронок. Американские исследователи [193, 258] в результате сопоставления зон локализации древних и современных провалов в границах 12 карстовых полей, расположенных на территории округа Hillsborough во Флориде пришли к заключению, что карстовый процесс, в пределах некоторых изучаемых участков, носит унаследованный характер. Иными словами пространственные максимумы развития древних провальных карстовых форм совпадают с ареалами современного провалообразования. Основной предпосылкой унаследованности является относительно небольшая мощность отложений перекрывающей толщи, либо их полное отсутствие. На участках, где мощность покровной толщи достаточно велика (превышает 10 м) отмеченная тенденция, как правило, не наблюдается.

Статистически обоснованные взаимосвязи между мощностью покровной толщи, представленной грунтами четвертичного возраста, и закарстованностью территории были получены Е.А. Ерофеевым и В.Н. Катаевым [56], а также И.А. Соколовой [138]. Примененная ими методика выявления взаимосвязей сводится к определению двух статистических показателей, предложенных В.В. Толмачевым [146]: *коэффициента связи Q* и *информационной энтропии E*. Как заключают Е.А. Ерофеев и В.Н. Катаев [56], с увеличением мощности песчаных отложений на опорном участке г. Дзержинска интенсивность образования провалов снижается, а при ее значении, достигающем 60 м и более, образование провалов и вовсе исключается. Для

участков, где глинистые отложения отсутствуют или их мощность не превышает 3-5 м, провалы практически не наблюдаются. Аналогичные результаты были получены для территории Заречной части г. Нижний Новгород И.А. Соколовой [138]. Расчет коэффициентов связи для двух факторов – мощности глин в толще перекрывающих отложений и глубины залегания карстующихся пород – позволил установить однозначную тенденцию: с увеличением значений обоих факторов количество карстовых провалов уменьшается, а вместе с тем и уменьшается интенсивность их образования.

Наличие в разрезе обвально-карстовых отложений относительно небольшой мощности (10-20 м) свидетельствует о затухании карстового процесса и как следствие, о снижении опасности его проявления [265]. Относительно устойчивыми к провалообразованию являются участки, в пределах которых мощность неоген-четвертичной (N-Q) карстовой брекчии максимальная, и она почти полностью слагает покровную толщу отложений, в некоторых случаях замещая карстующиеся породы [117]. На территориях г. Кунгур и пгт Полазна встречаемость карстовых форм на участках с мощностью обвально-карстовых отложений превышающих, соответственно, 20 и 30 м резко сокращается [77]. О снижении активности карста при наличии мощной толщи обвально-карстовых отложений свидетельствуют и результаты расчетов, выполненных Е.А. Ерофеевым и В.Н. Катаевым [56].

Степень карстоопасности при наличии покровной толщи, сложенной по классификации ГОСТ [1] скальными и полускальными грунтами (перекрытый тип карста), аналогично рассмотренным выше случаям зависит от мощности перекрывающих отложений. Согласно В.Н. Андрейчуку [27] определяющим фактором времени необходимого с момента образования свода над полостью до выхода ее на поверхность в условиях перекрытого карста является мощность перекрывающих отложений. Это отчетливо прослеживается на примере карстового массива, в котором сформировалась пещера Золушка (Западная Украина), где большинство новых провалов формируется в условиях поймы и первых надпойменных террас, для которых характерна небольшая мощность перекрывающих отложений. В зависимости от мощности перекрывающей толщи скальных пород, а также от стадийности провального процесса, который устанавливался по результатам прямых спелеологических наблюдений за сводами полостей, В.Н. Андрейчук [27] предложил методику зонирования по карстоопасности приповерхностной части в районе пещеры Золушка.

Впоследствии, В.Н. Андрейчук [27] на примере трех участков расположенных в пределах Западной Украины в разных геолого-структурных и карстогенетических условиях установил взаимосвязи между провальными карстовыми формами и мощностью перекрывающих

отложений, представленных различными по составу и возрасту отложениями (рисунок 1.1). Для всех исследованных участков характерен критический рубеж мощности перекрывающей толщи, выше которого карст на поверхности не проявляется – 50-55 м. Отмечая индивидуальные различия в характере изменчивости плотности карстовых форм с изменением мощности покровных отложений, В.Н. Андрейчук [27] указывает и на общий характер этой зависимости. На основе синтеза трех шкал им выделена региональная шкала оценки устойчивости территорий в зависимости от мощности перекрывающей толщи (рисунок 1.2).

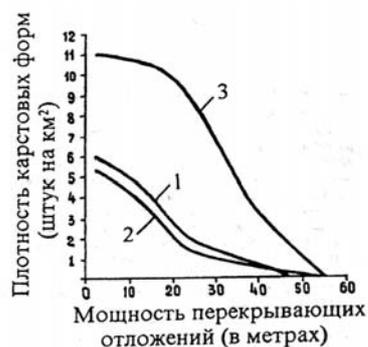


Рисунок 1.1. Связь плотности карстовых форм с мощностью перекрывающих отложений на территории сульфатного карста Западной Украины [27]. Участки: 1 – Серет-Ничвала; 2 – Черный Поток; 3 – Крива-Подвирное

Мощность отлож. м	Серет-Ничвала			Черный Поток			Крива-Подвирное			РЕГИОН	
	Условные обозначен.	шт/км²	Категория	Условные обозначен.	шт/км²	Категория	Условные обозначен.	шт/км²	Категория	Категория	шт/км²
5		5,5	Весьма неустойчивая		4,4	Неустойчивая		10,7	Весьма неустойчивая	Весьма неустойчивая	5,5 - 10,7
10		4,3	Неустойчивая					9,9	Неустойчивая	Неустойчивая	4,3 - 9,9
15											
20					1,3	Относительно неустойчивая					
25		1,7	Относительно неустойчивая								
30											
35		1,0	Слабо устойчивая					3,8	Слабо устойчивая	Слабо устойчивая	1,0 - 3,8
40											
45		0,2	Относительно устойчивая		0,2	Относительно устойчивая					
50								0,0	Устойчивая	Относительно устойчивая	0,2
55		0,0	Устойчивая		0,0	Устойчивая				Устойчивая	0,0

Рисунок 1.2. Региональная шкала устойчивости территорий сульфатного карста Западной Украины [27]

На сегодняшний день параметры геологического строения карстовых массивов широко используются при оценке морфометрических характеристик карстовых форм. Наиболее часто исследуются взаимосвязи между морфометрическими характеристиками карстопоявлений и мощностями перекрывающих отложений.

Е.А. Ерофеев и В.Н. Катаев [56] исследовали влияние мощности покровной толщи на диаметры карстовых провалов с применением статистического критерия – *коэффициента взаимной сопряженности А.А. Чупрова T*, впервые предложенного для решения

карстологических задач В.В. Толмачевым [146]. В результат расчета коэффициента T в пределах закарстованного участка магистрального газопровода в Ординском районе Пермского края была установлена значимая связь между этими характеристиками. К сожалению, установить направленность изменчивости диаметров провалов в зависимости от мощности перекрывающих отложений авторам не удалось.

М.С. Верзаков [35] отмечает, что диаметры провалов возрастают с увеличением общей мощности покровных отложений (глубины залегания карстующихся пород). Согласно И.А. Печеркину [117] при возрастании мощности покровной толщи пород вероятность образования провалов больших диаметров увеличивается. И.А. Саваренский [129] при исследовании диаметров провалов в районе г. Дзержинска установил, что к участкам с большей мощностью аллювия приурочены провальные воронки больших диаметров, чем к участкам с малой мощностью аллювиальных отложений.

Зарубежными исследователями отмечаются аналогичные закономерности. W.L. Wilson [263] в ходе изучения карстовых форм на северо-западе полуострова отмечает, что диаметры провалов при мощности перекрывающих отложений менее 10 м характеризуются незначительными размерами, в то время как при возрастании мощности до 30-50 м размеры провалов заметно возрастают. Бельгийские ученые [235] в ходе карстологических исследований в округе г. Турне (Бельгия) также свидетельствуют об укрупнении провальных карстовых форм в пределах участков с повышенной мощностью перекрывающих отложений. Немецкими исследователями в результате натурных наблюдений за процессом провалообразования в гипсах и ангидритах в пределах различных участков Гессена (Германия) было установлено, что с увеличением общей мощности карстующейся толщи и мощности покровной толщи отложений средние диаметры вновь образующихся провалов тяготеют к большим значениям [26].

Геологическое строение, выраженное через мощности карстующейся и покровной толщи отложений, J. Fenk [213] рассматривает как основной фактор образования провала, при наличии полости в толще карстового массива. им предложена зависимость, позволяющая оценить *условную вероятность* P_V образования провала при обрушении кровли полости:

$$P_V = \exp[0,08(h_p - 15) + 0,2m_K + 0,17(\max m_D)], \quad (1.40)$$

где h_p – высота полости, м; m_K – мощность карстующейся толщи, м; $\max m_D$ – максимальная мощность покровной толщи отложений, м.

Исходя из предположения о взаимосвязи между объемами обрушающейся полости и образующего при этом провала на поверхности земли Г. Адерхолд [26] были установлены детерминистические зависимости высот полостей и первичных диаметров провалов от мощности

отложений перекрывающей толщи (таблица 1.1, 1.2). В результате проведенных исследований в пределах территории Земли Гессен (Германия) ею были сделаны следующие выводы:

- вероятность образования провалов по механизму сквозного обрушения грунтов покровной толщи маловероятна при большой мощности перекрывающих отложений и малой высоте полости – на территории Земли Гессена 94% провалов произошли в пределах участков, где мощность перекрывающей толщи отложений не превышает 50 м;
- в карстующихся породах с максимальной высотой полости до 3 м и мощностями покровных пород от 30 м диаметры провалов находятся примерно в интервале 10-14 м;
- расчетный критический пролет (среднюю ширину) полости, при котором происходит обрушение ее свода, невозможно установить в ходе буровых и даже геофизических работ. Данный параметр в современных условиях определяется на основе разработанных расчетных моделей провалообразования. На территории Гессена было установлено, что с увеличением мощности перекрывающей толщи с 1 до 3 м и первоначального диаметра провала с 1 до 4 м критический пролет полости линейно увеличивается с 2 до 7 м.

Таблица 1.1. Предельные мощности пород покровной толщи в зависимости от первичного диаметра провала и высот полости от 1 до 4 м [26]

Первичный диаметр провала, м	Мощности покровной толщи, м, необходимые для образования провалов определенного первичного диаметра при высоте полости, м			
	1	2	3	4
1	23,0	46,6	70,0	93,0
2	12,0	24,0	36,0	47,8
3	9,0	18,0	27,0	35,9
4	8,0	15,3	23,0	30,6
5	6,8	13,6	20,4	27,1
6	6,2	12,5	18,7	24,9
7	5,8	11,6	17,4	23,0
8	5,5	11,0	16,5	22,0
9	5,3	10,5	15,8	21,0
10	5,1	10,1	15,2	20,2
11	неизвестно	9,8	14,7	19,6
12	неизвестно	9,5	14,3	19,0
13	неизвестно	9,3	14,0	18,6
14	неизвестно	9,1	13,7	18,2

Таблица 1.2. Требующиеся высоты полостей при определенных первичных диаметрах провалов и мощностях покровной толщи [26]

Первичный диаметр провала, м	Высоты полостей, м, необходимые для образования провалов определенного первичного диаметра при мощности покровной толщи, м			
	50	100	200	300
10	9,0	13,0	18,5	23,0
20	13,0	18,3	26,0	32,0
30	16,0	22,4	32,0	39,0
40	18,6	26,0	37,0	45,0
50	20,8	29,0	41,0	51,0
100	29,5	40,0	58,0	72,0

1.2.3. Гидрогеологические условия

В гидрогеологическом отношении интенсивность закарстованности и соответственно опасность развития карста, зональность его проявления, обуславливается особенностями дренирования подземных вод и их гидрохимическим составом. Согласно А.Н. Ильину [66] структурный план карстующихся отложений, характер их закарстованности, особенности развития подземных и поверхностных форм карстового рельефа можно установить по данным анализа уровней и химического состава подземных вод. Таким образом, оценка карстоопасности с учетом гидрогеологических условий развития карстового массива рассматривается в двух аспектах: 1) по показателям, учитывающим *гидродинамику* подземных вод и 2) по показателям, рассматривающим особенности их *химического состава*.

Гидрогеологические параметры карстового массива характеризуются широкой изменчивостью в пространстве и времени, причем, чем больше степень его закарстованности, тем сложнее его гидрогеологические условия и наоборот. В отличие от геологического строения массива, остающегося относительно неизменным в течение времени, достоверная оценка гидрогеологических условий требует постоянного мониторинга за изменением гидродинамических и гидрохимических параметров [84].

Основные факторы гидрогеологических условий и их влияние на интенсивность провального процесса в самом общем случае были подчеркнуты китайскими исследователями [240]. В ходе проводимого ими неоднократного моделирования карстового процесса на натурном стенде, разработанном в институте геологии карста (Institute of Karst Geology) Гуйлиньского городского округа были выявлены следующие закономерности:

- 1) *инфильтрация дождевых и поверхностных вод* в подземные водоносные горизонты является одним из главных факторов, влияющих на образование провалов;
- 2) *понижение уровня подземных вод* приводит к активизации процесса и формированию новых провалов на поверхности земли;
- 3) процесс провалообразования находится в прямой зависимости от *скорости понижения уровня подземных вод*.
- 4) активность протекания карста зависит от *колебаний уровня подземных вод* – чем чаще и интенсивнее происходят колебания, тем более вероятно образование провала;

Интенсивность инфильтрации поверхностных и дождевых вод в подземные водоносные горизонты может быть охарактеризована *модулями поверхностного M_S и подземного M_U стока*, физических смысл которых заключается в объеме воды стекающей с определенной площади в единицу времени ($\text{дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$). Методика определения этих показателей широко освещена в

гидрогеологической литературе [140]. Влияние инфильтрации поверхностных вод на активность карста может быть выражено *показателем подземно стока* P_U [82]:

$$P_U = \frac{M_U}{M_S} \quad (1.41)$$

Чем выше значение показателя P_U , тем больше поверхностных вод поступает в подземные водоносные горизонты, что влечет за собой прямое влияние на активизацию карстового процесса.

Оценка *коэффициентов фильтрации* грунтов покровной толщи методами откачек и наливов из шурфов и скважин с применением различных схем и формул может косвенно свидетельствовать о скорости инфильтрации поверхностных вод.

Понижение уровня подземных вод, как грунтовых, так и карстовых, является одним из наиболее используемых показателей при оценке карстоопасности по гидрогеологическим признакам. Американские исследователи отмечают, что вследствие понижения уровня грунтовых вод неконсолидированные слабосвязанные дисперсные отложения становятся нестабильными и под действием гравитационных сил перемещаются, заполняя открытые полости и пустоты [239]. Согласно Г. Адерхолд [26] понижение уровня подземных вод на территории Гессена (Германия) повлекло за собой усиление процесса провалообразования вследствие активизации суффозии.

Общее понижение уровня подземных вод сопровождается увеличением зоны аэрации, что способствует более интенсивному развитию карста [34, 65]. Например, бельгийскими карстоведами в результате сопоставления плотности карстовых провалов и мощности зоны аэрации произведена оценка карстоопасности в окрестностях г. Турне [235]. Зоны, характеризующиеся различным уровнем опасности, выделялись экспертным методом. Основная причина снижения уровня подземных вод связана с увеличением техногенного воздействия, которое сопровождается усилением отбора подземных вод для бытовых и производственных целей [231, 233, 236].

Колебание уровня подземных вод, главным образом карстовых горизонтов, в широких пределах способствует карстообразованию [26]. Колебания уровня зависят от суммарного воздействия природных и техногенных факторов. Активизация провального процесса часто приходится на весенний и осенний периоды, характеризующие повышением уровня грунтовых вод, связанного с обильными половодьями и паводками, в результате которых происходит поступлением слабоминерализованных поверхностных вод в карстовые водоносные горизонты. Колебания уровня воды, связанные с техногенными воздействиями возникают эпизодически вследствие утечек из трубопроводов, сезонностью производства, регулирования дебита откачек и т.д.

Количественная оценка изменчивости уровня подземных вод может быть дана по результатам наблюдения за дебитами карстовых источников и родников. Для того используется расчетный показатель – коэффициента колебания дебитов карстовых источников R_Q [82]:

$$R_Q = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}, \quad (1.42)$$

где Q_{\max} и Q_{\min} – максимальные дебиты карстовых источников, родников, скважин за период наблюдения, м³/сут.

Согласно Р.Е. Lamogaux и J.G. Newton [239], исследуя только лишь гидрогеологические условия можно качественно оценить степень карстоопасности рассматриваемой территории. Наиболее опасными являются участки, где *уровень подземных вод* находится ниже отметки кровли карстующихся отложений. Образование новых провалов наименее вероятно в условиях полного насыщения карстующихся отложений и грунтов перекрывающей толщи водой, а также наличия активной взаимосвязи между горизонтами карстовых и грунтовых вод. Такие участки могут быть отнесены к относительно неопасным. Наблюдения американских ученых в целом согласуются с результатами исследований положения уровней карстовых вод, участков развития провалов и полостей на территории г. Кунгур [72]. Таким образом, уровень подземных вод может использоваться в качестве критерия опасности.

Количественный критерий оценки карстово-суффозионной опасности по гидрогеологическим признакам при наличии покровной толщи, представленной песчано-глинистыми отложениями, был предложен В.М. Кутеповым и В.Н. Кожевниковой [87]. Вероятность образования провала зависит от *градиента вертикальной фильтрации* I_V воды в глинистой разделяющей толще, который определяется *разницей напора* ΔH в перекрывающей песчаной толще и закарстованных породах, а также *мощностью слабопроницаемой глинистой толщи* m_2 :

$$I_V = \frac{\Delta H}{m_2} \quad (1.43)$$

Определяющую роль напора подземных вод и градиента их фильтрации на активность протекания процесса суффозии, а вместе с тем и на образование карстово-суффозионных провалов отмечают многие отечественные исследователи [121, 138, 159-161]. Считается, что образование карстово-суффозионных провалов может происходить при градиенте вертикальной фильтрации, большей 3. Такие условия создаются, когда мощность слабо проницаемой глинистой толщи в два раза меньше мощности песчаной толщи [114]. Значения градиента, превышающие 10, связаны с нарушением режима подземных вод, что может быть вызвано вероятным наличием крупных систем подземных каналов. В зависимости от значений I_V В.М.

Кутепов и В.Н. Кожевникова предлагают выделять три категории карстоопасности – весьма опасную, опасную и неопасную.

Гидрохимический состав подземных вод при оценке карстоопасности анализируется с позиций содержания основных ионов, и агрессивности воды к карстующимся породам [12]. Определение скорости и интенсивности карстового процесса должно основываться на оценке скорости выщелачивания и всех сопутствующих процессов [108]. Скорость выщелачивания находится в прямой зависимости от химизма карстовых вод, а также от скорости их движения.

Распространенным способом оценки активности карста является изучение *минерализации подземных вод*. Наиболее опасными участками карстового массива считаются те, в пределах которых грунтовые и карстовые воды характеризуются небольшим содержанием солей и являются пресными или слабосоленатыми [66, 71]. Например, на территории Италии большинство провальных воронок приурочено к площадям с относительно небольшой минерализацией подземных вод (до 0,5 г/дм³) и нейтральной кислотнo-щелочной средой [248]. Характерным индикатором карстоопасности является наличие активного гидрогеологического режима и интенсивного водного потока. Так, на участках, в пределах которых нередко наблюдаются выходы минерализованных карстовых вод на поверхность в форме источников, а иногда и в виде небольших карстовых рек, как правило, велика интенсивность провалообразования. Маркирование таких участков предлагается осуществлять по *коэффициенту геохимической неоднородности* K_g , предложенным В.П. Костаревым [82]:

$$K_g = \frac{\sum g}{C}, \quad (1.44)$$

где g – количество геохимических аномалий в пределах исследуемого участка, устанавливаемых по значениям минерализации подземных вод, резко отличающимся от фоновых, шт.; C – общее количество точек опробования подземных вод, шт.

Одним из способов оценки активности соляного карста является сопоставление минерализации карстовых вод с максимальной растворимостью каменной соли в водном растворе, равной 318 г/дм³ [12]. Если минерализация воды ниже этой величины, то карстовый процесс находится в активной стадии своего развития.

Интенсификация провалообразования может быть вызвана широкой изменчивостью минерализации подземных вод в течение некоторого периода. Такая ситуация может возникнуть как в результате действия сугубо природных факторов (обильные осадки), так и в результате техногенного воздействия (утечки из коммуникаций, влияние производства) на карстовый массив в условиях его повышенной трещиноватости и гидрогеологической проницаемости. В.П. Костарев [82] изменчивость минерализации воды предлагает оценивать *коэффициентом колебания минерализации карстовых вод* K_M :

$$K_M = \frac{M_{\max}}{M_{\min}}, \quad (1.45)$$

где M_{\max} и M_{\min} – соответственно, максимальное и минимальное значения минерализации карстовых вод за период наблюдений, г/дм³.

Оценить интенсивность карстообразования на определенном линейном участке, ориентированном вдоль подземного потока, можно в результате расчета *градиента выщелачивания* q_m [82]:

$$q_m = \frac{M_L - M_0}{0,01 \cdot L}, \quad (1.46)$$

где M_L и M_0 – минерализация подземных вод, соответственно, в конечной и начальной точках участка, г/дм³; L – длина линейного участка, м.

Более точные методы оценки активности карста ориентированы на изучение агрессивности подземных вод к карстующимся породам, которая устанавливается в результате исследования взаимодействия отдельных ионов расчетным путем.

Исследования В.И. Смирнова [135] и А.В. Шурубора [172] показали, что распределение вероятностей (частот) концентрации химических элементов в природных водах, находящихся в состоянии химического равновесия в однородной природной обстановке, должно следовать нормальному закону. Однородное распределение частот концентраций химических элементов, подчиняющееся нормальному закону, служит указанием на существование в системе состояния, близкого к химическому равновесию. Изменчивость минерализации природных карстовых вод, как суммы концентраций всех ионов, также подчиняется нормальному закону в условиях наличия химического равновесия. Наблюдаемые отклонения от нормального распределения являются прямыми признаками активизации карстового процесса.

Активизация карста начинается при недостаточном насыщении подземных вод ионами, формирующими химический состав карстующихся пород. Оценка агрессивности подземных вод к различным карстующимся породам может быть определена в результате расчета *произведения активностей* a ионов и сопоставления их с *произведениями растворимости* K , характерными для соответствующих пород [12]. Например, произведение активностей известняка получается в результате перемножения содержания ионов Ca^{2+} и CO_3^{2-} , гипса – Ca^{2+} и SO_4^{2-} . При этом в расчет дополнительно вводятся различные поправочные коэффициенты. Подробно методика расчета произведения активностей изложена в [12]. В случае, когда произведение активностей меньше произведения растворимостей равновесие в системе «вода – порода» отсутствует и чем больше эта разница, тем более интенсивно развивается карстовый процесс. Величина произведения растворимости известняков и доломитов равна, соответственно, $4,38 \cdot 10^{-9}$ и $2 \cdot 10^{-15}$, гипсов и ангидритов – $2,96 \cdot 10^{-5}$ и $3,55 \cdot 10^{-5}$.

Еще один способ оценки активности карста по степени агрессивности подземных вод к карстующимся породам заключается в определении дефицита насыщения воды соответствующими ионами (мг/дм^3). Наиболее разработанными являются методики оценки дефицита насыщения подземных вод сульфатом кальция и карбонатом кальция, рекомендуемые к применению в условиях карбонатного и сульфатного карста. Алгоритм расчета дефицита насыщения сульфатом кальция одним из первых предложил В.П. Костарев [81] и впоследствии адаптировал его к условиям сульфатного карста Предуралья [22]. Общий порядок расчета дефицитов насыщения сульфатом и карбонатом кальция рассмотрен в [12]. Чем больше дефицит насыщения, тем более агрессивными являются подземные воды к карстующимся отложениям. Состояние равновесия достигается при его значениях равных и приближенных к нулю.

Карстоопасность территории может быть приблизительно оценена в результате разделения всего диапазона значений дефицита насыщения или разницы произведений активностей и растворимостей на определенное количество интервалов, характеризующихся различной агрессивностью воды к карстующимся породам. Каждому такому интервалу ставится в соответствие определенная интенсивность развития карста, напрямую связанная с растворяющей способностью воды, в результате чего они качественно охарактеризуются некоторой степенью опасности.

1.2.4. Геоморфологические условия

Геоморфологическое строение оказывает существенное влияние на развитие и распределение карста. В зависимости от особенностей геоморфологических условий в широком диапазоне варьируют почвы, растительность, формирование поверхностного и подземного стока и инфильтрация атмосферных вод в карстующийся массив. В связи с этим прямые и косвенные геоморфологические признаки следует учитывать и изучать в ходе карстологических исследований [178].

В большинстве карстовых районов наблюдается разветвленная долинная сеть. Согласно И.А. Печеркину [118] оценивая обстановку карстообразования относительно магистральных речных долин (горизонтальная зональность) в первом приближении можно выделить три типа условий: *прибрежный*, *промежуточный* и *водораздельный*.

Прибрежная зона является наиболее неблагоприятной в плане инженерно-хозяйственного освоения. Здесь происходит интенсивное течение карстового процесса с образованием различных форм карста. Граница зоны устанавливается по распространению подпора подземных вод. На берегах крупных водных артерий ширина зоны может достигать 1,5-2,0 км. В случае более мелких рек и озер ширина прибрежной зоны изменяется, как правило, от 500 до 800 м. Наличие

характерной повышенной потенциальной карстоопасности прибрежных зон отметил В.С. Лукин [95] при исследованиях долин рек в условиях сульфатно-карбонатных карстовых массивов Пермского Предуралья.

Переходная зона от побережья к водоразделу часто приурочена к участкам сочленения аккумулятивных террас и коренного склона и занимает промежуточное положение в отношении активности развития карстового процесса. В условиях умеренных широт аллювиальный покров в пределах молодых и древних террас переходной зоны, как правило, характеризуется значительной мощностью, может включать линзы ила и торфа, отложившихся в карстовых впадинах, и подстилается неровным слоем крупнообломочных отложений. Нормальный разрез аллювия нередко нарушается позднейшими оседаниями и обвалами. Породы имеют весьма неровную поверхность и пронизаны каналами, заполненными водой [95].

Однако и в условиях переходной зоны встречаются сильно закарстованные участки, приуроченные к геоморфологически замкнутым водосборным площадям [63].

Водораздельная зона характеризуется небольшой активностью протекания карста. Это во многом объясняется отсутствием подпора уровня подземных вод и часто глубоким залеганием карстующихся отложений.

Характерная закономерность снижения интенсивности карстопроявлений по мере удаления от речных долин и повышение закарстованности прибрежных участков по сравнению с водоразделами отмечается в [5] и в работе В.В. Толмачева и Ф. Ройтера [151]. Зарубежные исследователи также отмечают закономерность формирования провалов в области поймы и низких террас [26, 227, 265].

Немаловажное значение при рассмотрении особенностей геоморфологического строения территорий применительно к активности карстообразования имеет расчлененность рельефа и его общая крутизна (вертикальная зональность). Установлено, что с увеличением крутизны склона карстовый процесс постепенно затухает. Б.Н. Иванов [63] указывает, что поверхностная закарстованность отсутствует на склонах с уклонами более 12°. Уклон рельефа напрямую связан с характером его поверхностной расчлененности. Повышенная крутизна откосов и склонов характерна для районов со сложным геоморфологическим строением, интенсивной «изрезанностью» рельефа. Интенсивность карстообразования в таких условиях, как правило, относительно невысока. Так, Б.Н. Ивановым и С.М. Зенгиной [64] на примере Горного Крыма была установлена обратная зависимость между интенсивностью поверхностного закарстования территории, горизонтальным расчленением рельефа и уклонами склонов.

Оценка геоморфологических условий карстообразования на базе конкретных показателей-факторов является одной из ключевых составляющих общей оценки карстоопасности.

Конкретный набор оценочных показателей геоморфологического строения может сильно различаться в зависимости от характера и масштабного уровня исследований.

Согласно [4] основными геоморфологическими показателями-факторами, влияющими на развитие карста, являются: морфология водоразделов и речных долин; крутизна поверхности; расчлененность рельефа овражно-балочной сетью; микрорельеф. Методическими рекомендациями при средне- и мелкомасштабных региональных исследованиях оценку геоморфологических условий рекомендуется осуществлять путем построения специализированного комплекса карт, сопоставляемых впоследствии с карстологическими условиями района:

- Карта изобазит представляет собой базисную поверхность, образованную изобазитами – плавными линиями, соединяющими точки пересечения горизонталей с тальвегами долин. Карты базисных поверхностей строятся дифференцированно по порядкам рек. В особенностях изобазит отражаются новейшие и более древние структурные элементы.

- Карта разности изобазит получается в результате графического вычитания двух базисных поверхностей разных порядков. Карта позволяет судить о смещении местности по высоте за время, прошедшее между образованием долин этих порядков.

- Карта изолонг основана на ряде закономерностей, установленных Р. Хортоном [164], согласно которым в каждом речном бассейне с увеличением порядка долин уклоны уменьшаются, а длина возрастает в геометрической прогрессии. Следовательно, в идеальном случае длины долин одного порядка должны быть одинаковыми. Отклонения от этого правила, вызванные структурно-тектоническими и литологическими факторами, образуют аномальные участки. Анализ последних позволяет выявить тектонические зоны, наиболее активные в плане карстообразования.

1.2.5. Инженерно-геологические условия

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*. Эти параметры во многом определяют характер постгенетических (в том числе и дислокационных) преобразований и составляют основу (матрицу) структуры массива [69].

Инженерно-геологические условия во многом предопределены геолого-гидрогеологическими особенностями территории, также оказывая на них обратное воздействие. Без знания конкретной инженерно-геологической обстановки нельзя однозначно говорить о той

или иной тенденции при изменении уровня подземных вод. Эту тенденцию можно установить лишь на основе выявления состава, состояния и свойств грунтов, а также механизма карстовых деформаций в конкретных природных условиях [117, 233].

В результате моделирования карстового процесса на натурном стенде, разработанном в институте геологии карста (Institute of Karst Geology) Гуйлиньского городского округа китайскими исследователями [240] было установлено, что мощность перекрывающих отложений имеет второстепенное значение при оценке вероятности образования провала, а главная роль отводится структуре и свойствам грунтов покровной толщи.

По В.Н. Андрейчуку [27] критическое значение параметра мощности перекрывающих отложений определяется, прежде всего, их составом. Наиболее карстоопасными являются территории, где карстующиеся породы перекрыты рыхлыми отложениями с незначительными по величине деформационно-прочностными свойствами.

Немаловажным фактором, обуславливающим карстоопасность, выступает наличие слоистости в перекрывающей толще отложений [198]. Например, на территории Италии слоистое строение покровной толщи, представленной аллювиальными пылевато-глинистыми, реже песчаными отложениями со слабыми физико-механическими свойствами способствует активизации карста даже в условиях относительно большой мощности покровной толщи [248].

Большая часть вновь образующихся провалов на юге Китая происходит в условиях многослойного строения перекрывающей толщи [231], в составе которой выделяются частые сменяющие друг друга прослои пластичных глинистых и песчаных грунтов с включениями крупнообломочного материала, нередко с прослоями слабых грунтов. При этом в северной части КНР, где в покровной толще залегают главным образом твердые и полутвердые пылевато-глинистые грунты с прослоями песчано-гравийных отложений, случаи образования провалов регистрируются значительно реже [237].

Процесс провалообразования в результате обрушения кровли полости в условиях слоистого строения перекрывающей толщи отложений носит дискретный характер. Это выражается не в единовременном, а в последовательном обрушении отдельных слоев друг за другом, что в некоторых случаях может привести к росту полости. Данное обстоятельство особенно ярко проявляется, когда в строении покровной толщи присутствуют полускальные породы [26].

Характерной закономерностью в развитии провального процесса является его затухание при повышении глинистости покровной толщи [34, 65, 198]. Об этом также свидетельствуют испытания китайских ученых на натурной модели [240]. Слабую активность карста при малой мощности покровных отложений, в случае, когда они представлены водоупорными юрскими глинами и моренными суглинками, затрудняющими инфильтрацию поверхностных вод отмечает

А.А. Сафронова [134]. По данным W.L. Wilson [263] на территории Флориды на участках, в пределах которых в покровной толще развиты глинистые прослои мощностью до 3 м, как правило, образуются провалы меньших диаметров, а их интенсивность заметно снижается.

Провалы, сформированные в условиях несвязных дисперсных отложений покровной толщи, имеют, как правило, воронкообразную форму в разрезе. Если покровная толща грунтов представлена связными глинистыми отложениями, то провал тяготеет к цилиндрической форме, а иногда имеет форму перевернутой воронки [231]. На территории Германии данные замечания справедливы при незначительной мощности перекрывающей толщи отложений (до 5-10 м) [26].

Одним из перспективных направлений оценки карстоопасности в последние годы является статистический анализ физико-механических свойств грунтов и их влияния на активность карстового процесса. Например, ранее нами была произведена попытка установить закономерности между свойствами грунтов перекрывающей толщи и распространением карстовых форм на территории г. Кунгур [173]. Для этого анализировались два физических показателя – *плотность грунтов* при природном сложении и *коэффициент пористости*. Все множество наиболее часто встречающихся на территории города грунтов было разделено на группы и подгруппы в зависимости от их вида и состояния (супесь твердая, песок мелкий и т.д.). В результате такого анализа было установлено, что распространение карстовых форм тяготеет к средним значениям обоих свойств и в большинстве случаев достаточно точно описывается нормальным законом распределения. Позже данные исследования были дополнены механическими характеристиками свойств грунтов [185]. Установлено, что большая часть карстовых форм тяготеет к средним значениям *модуля общей деформации* и *удельного сцепления* с небольшой асимметрией в сторону больших значений. В случае *угла внутреннего трения* асимметрия в сторону больших значений несколько больше.

Похожие исследования проводились немецкими специалистами. В ходе массовых статистических исследований на территории Земли Гессен (Германия) были установлены значения физико-механических свойств грунтов при различной мощности покровной толщи, при которых наиболее вероятно образование провала [26].

В результате многократных лабораторных испытаний грунтов на срез с целью определения критериев разрушения Мора было установлено, что наиболее вероятно и быстротечно по времени провалы образуются в условиях наличия мощной перекрывающей толщи (более 50 м), представленной глинистыми грунтами и гипсоангидритами. При наличии в строении покровной толщи известняков и песчаников, наоборот, процесс провалообразования затухает. Механические характеристики хрупких и рыхлых полускальных грунтов, а также пластичных глинистых грунтов, отобранных из различных слоев в пределах территории Гессена, при которых наиболее вероятно обрушение полостей и формирование провалов приведены в

таблице 1.3. Вместе с тем наиболее крупные провалы следует ожидать при наличии в покровной толще хрупких полускальных пород, в то время как преобладание глинистых грунтов, наоборот, приводит к значительному уменьшению параметров провалов.

Таблица 1.3. Физико-механические свойства грунтов в условиях мощной перекрывающей толщи, характеризующие наиболее вероятные условия обрушения кровли полостей в районах Гессена [26]

Грунт	Прочность на сжатие σ_p , кПа	Прочность на растяжение σ_z , кПа	Удельный вес γ , кН/м ³	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
Известковый мергель	10 – 24	0,2 – 0,3	26,6	10	36 – 42
Известняк	20 – 36	0,8 – 1,6	26,0 – 28,0	90 – 110	35 – 45
Ангидрит рухляк	3 – 5	0,2 – 0,6	15,0 – 20,0	2 – 5	25 – 27
Глинистый грунт	6 – 9	0,6 – 0,9	27,0 – 29,0	78 – 120	20 – 32
Песчаник	15 – 20	1,0 – 2,7	27,0 – 28,0	370 – 510	23 – 37

В условиях неглубокого залегания карстующихся пород (до 5 м), перекрытых пылевато-глинистыми отложениями, основными инженерно-геологическими факторами формирования провала над кровлей полости являются деформационные и прочностные свойства грунтов. Напряжения вызывающие обрушение полости, зависят в первую очередь от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов. Для покровных лессовидных и лессовых суглинков, развитых на территории Гессена (Германия), были установлены значения физико-механических характеристик, при которых происходит обрушение полости (таблица 1.4).

Согласно Г. Адерхолд [26] снижение удельного сцепления, например вследствие дождей, приводит к ускорению обрушения полости. В условиях несвязной толщи отложений процесс обрушения происходит не явным образом, а в результате оползания грунтов в полость без задержки во времени и соответственно своему углу внутреннего трения. С этим связана повышенная частота образования новых провалов при преобладании песчаного материала в составе перекрывающей толщи отложений.

Таблица 1.4. Физико-механические свойства грунтов незначительной по мощности перекрывающей толщи, характеризующие наиболее вероятные условия обрушения кровли полостей в районах Гессена [26]

Прочность на сжатие σ_p , кПа	Прочность на растяжение σ_z , кПа	Удельный вес γ , кН/м ³	Угол внутреннего трения φ , °	Удельное сцепление c , кПа
27 – 29	3 – 5	19 – 22	26 – 28	8 – 18

На основании статистических исследований глубин провалов и физико-механических свойств грунтов небольшой по мощности и однородной по составу перекрывающей толщи отложений J. Liszkowsky [243] были установлены зависимости между глубиной провалов,

сцеплением, углом внутреннего трения и удельным весом грунтов. Так, *минимальная* z_{\min} и *максимальная* z_{\max} возможные глубины провала (м), могут быть оценены по формулам:

$$z_{\min} = 2c / \gamma, \quad (1.47)$$

$$z_{\max} = \frac{4c}{\gamma} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1.48)$$

где c – удельное сцепление, кПа; φ – угол внутреннего трения, °; γ – удельный вес, кН/м³.

Как отмечает Г. Адерхолд [26], расчеты по формулам J. Liszkowsky сопоставимы с результатами натуральных наблюдений за глубинами провалов на территории Гессена.

В настоящее время по-прежнему не имеет однозначного решения задача, связанная с прогнозированием средних диаметров карстовых провалов в зависимости от инженерно-геологических условий, в частности, от физико-механических свойств грунтов перекрывающей толщи. Известно, что первоначальный диаметр провала зависит от *механизма образования* и является функцией *объема полости* и *физико-механических свойств* пород перекрывающей толщи отложений [26, 151].

В инженерном карстоведении известно два принципиальных механизма образования провалов и оседаний поверхности земли – обвально-карстовый и карстово-суффозионный. Все поверхностные карстовые формы образуются либо по первому, либо по второму сценарию, либо в результате совместного действия обоих этих механизмов [161]. Детально частные случаи механизма формирования провалов, просадок и локальных оседаний в карстовых районах рассмотрены в работах В.В. Толмачева и Ф. Ройтера [151], В.Н. Андрейчука [27], а также в некоторых учебных пособиях [53]. Согласно [151] с определенной долей приближения карстовые формы в карбонатных породах можно с инженерно-геологической точки зрения считать аналогами карстовых форм в сульфатных породах в отношении механизма их образования.

Наиболее общие механизмы формирования провалов и локальных оседаний рассматривает В.Н. Андрейчук [27]. Им выделяется четыре принципиальных пути их развития, в зависимости от которых определяется и методика оценки потенциальной карстоопасности: 1) гравитационно-обвальный (обрушение сводов некарстующихся отложений); 2) гравитационно-обвальный (обрушение сводов карстующихся пород); 3) инфильтрационно-обвальный (механизм «органных труб»); 4) карстово-суффозионный.

В случае провалов обвально-карстового типа (первые 3 типа по В.Н. Андрейчуку), качественный прогноз карстоопасности осуществляется по состоянию грунтов покровной толщи, определяемого положением уровня подземных вод. Так, снижение уровня подземных вод ведет к уменьшению давления на кровлю полости и повышению прочности пород водопроницаемой кровли за счет увеличения значений сцепления и угла внутреннего трения осушенной толщи.

Это приводит к тому, что обрушение кровли полости и образование провала происходят при большей ширине полости, чем до снижения уровня воды. Таким образом, в этом случае интенсивность провалов, при прочих равных условиях, уменьшается, а диаметр их увеличивается. Обратная картина наблюдается при повышении уровня грунтовых вод, в результате чего интенсивность образования провалов повышается, а их диаметры уменьшаются [151].

Карстово-суффозионный механизм образования провалов связан с небольшими пустотами и трещинами в карстово-обвальных отложениях или в приповерхностной части карстующейся толщи, в которые подземными водами выносятся рыхлый мелкодисперсный несвязный материал. Рассматривая карстово-суффозионные провалы, В.Н. Андрейчук [27] отмечает их значительную связь с обвальными карстовыми отложениями и карстовой брекчией, ввиду чего, по его мнению, их практически невозможно предсказать пространственно. Кроме того, он отмечает, что линейные размеры таких провалов, как правило, незначительны, а их диаметры редко превышают 3 м. Аналогичный вывод делают В.В. Толмачев и Ф. Ройтер [151], дополнительно указывая, что прогноз диаметров возникающих провалов в данном случае является очень неоднозначным.

Заметим, что приведенная классификация не является универсальной, а лишь достаточно точно описывает наиболее общие механизмы провалообразования, встречающиеся в различных природных условиях.

Механизм образования провала на поверхности земли является основой для создания расчетных схем определения диаметров провалов и параметров морфометрии полостей в зависимости от физико-механических характеристик грунтов покровной толщи и гидрогеологических условий, изменяющихся во времени. Практически все эти методы ориентированы на определение диаметров (средних, минимальных, максимальных) провала при условии действия внешнего давления от сооружения, а в некоторых случаях, необходимым условием расчета являются данные по параметрам его фундамента. В настоящее время разработано достаточное количество расчетно-теоретических схем для оценки диаметров круглоцилиндрических провалов и критических пролетов полостей, основой которых являются аналитические зависимости теорий прочности Кулона-Навье или Кулона-Мора [110]. Многие из них детально проанализированы в работах [67, 86, 149, 151].

Детерминистические расчетно-теоретические схемы-модели по определению критических диаметров провалов и установлению критических пролетов полостей в зависимости от характера напластования и свойств покровной толщи отложений целенаправленно не рассмотрены в настоящем обзоре. Такие расчетные схемы являются сугубо индивидуальными и, как правило, ориентированы на решение задач под конкретные частные случаи. Отсутствие универсальности

делает их мало пригодными при оценке опасности проявления карста по данным изучения карстовых форм, приуроченных к различным природным обстановкам.

Принципиально другой подход заключается в установлении статистических зависимостей между параметрами морфометрии карстовых форм и физико-механическими свойствами грунтов, на основании которых впоследствии осуществляются прогнозные оценки о вероятных размерах будущих карстопроявлений. Однако такие оценки карстоопасности по-прежнему не имеют показательных примеров. Принимая во внимание исследования последних лет [26, 185] данное направление в развитии инженерного карстоведения видится достаточно перспективным.

1.3. Интегральная оценка карстоопасности

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 карстопроявлений. В зависимости от способа комплексирования факторов природных условий и показателей закарстованности можно выделить следующие три типа интегральных оценок:

- 1) качественные оценки;
- 2) полуколичественные оценки;
- 3) количественные оценки.

1.3.1. Качественные оценки

Комплексный подход к оценке карстоопасности наиболее просто осуществим с применением качественных методов. Они подразумевают разделение исследуемой территории на ряд площадей и участков в зависимости от природных условий развития карста и характера закарстованности [16]. В инженерной геологии данная процедура сводится к районированию территории, 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.

Общей чертой всех качественных оценок является их субъективность, т.е. прямая зависимость конечного результата от мнения эксперта, осуществляющего районирование. Это относится к выделению границ таксонов, к подбору показателей природных условий, а также к выделению отдельных признаков или категорий, в рамках каждого показателя.

Качественные оценки являются широко распространенными в инженерно-геологической практике, ввиду простоты и доступности их осуществления. Они не требуют применения сложного математического аппарата и поэтому понятны широкому кругу специалистов. Однако заметим, что отсутствие математической основы накладывает ряд ограничений, одно из которых заключается в количестве рассматриваемых показателей природного строения, число которых при качественных построениях, как правило, относительно невелико.

В инженерном карстоведении качественные подходы являются преобладающими методами интегральной оценки карстоопасности и устойчивости территорий по набору факторов их природного строения. Они широко применялись и применяются как отечественными, так и зарубежными исследователями карста. В настоящее время количество предложенных методик настолько велико, что рассмотреть их все не представляется возможным. Примечательным является то, что многие авторы рассматривают лишь отдельные аспекты природных условий развития карста.

Например, зарубежными специалистами по характеру отложений карстующейся толщи и выраженности проявлений карста в рельефе и в массиве пород была составлена схема зонирования территорий, примыкающих к г. Париж по степени карстоопасности [87] (таблица 1.5).

Таблица 1.5. Зонирование территории по степени карстоопасности в районе Парижа [87]

Зона	Характеристика
Зона I (внутренняя)	Монолитный гипс мощностью около 10 м. Малое количество замещенных или брекчированных горизонтов. Слабо выраженная и обособленная закарстованность. Отсутствие крупных пустот.
Зона II	Отдельные линзы гипса (0-10 м), наличие замещенных и брекчированных горизонтов, ярко выраженная закарстованность (крупные пустоты, ослабленные или осевшие зоны), наличие провалов на поверхности.
Зона III (наружная) подзона III-а подзона III-б	Полное отсутствие гипса, наличие замещенных горизонтов, процесс карстования закончен. Наличие остаточных пустот и ослабленных зон. Наличие древних структур, образовавшихся вследствие обрушения кровли.

Согласно А.Н. Ильину [66] комплексный анализ геолого-гидрогеологических материалов позволяет уяснить схему карстового процесса, выявить благоприятные и неблагоприятные для развития карста факторы и степень их влияния, составить предварительную карту районирования территории по условиям и степени закарстованности. Методику районирования и оценки устойчивости территории в зависимости от геолого-гидрогеологической обстановки и закарстованности массива предложил П.И. Яковенко [189, 190] (таблица 1.6). Предложенный им подход был разработан и апробирован при оценке устойчивости северо-восточной части г. Чусовой.

Таблица 1.6. Категории устойчивости, в зависимости от геолого-гидрогеологической обстановки и закарстованности массива на территории г. Чусовой [189, 190]

Категория устойчивости	Характеристика условий карстообразования
I – весьма неустойчивая	Интенсивное развитие карста в гипсах и ангидритах за счет поступления слабоминерализованных атмосферных осадков и подземных вод из вмещающих карбонатных и терригенных пород. Характерны крупные подземные полости и формирование провальных впадин.
II – неустойчивая	Интенсивное развитие карста в гипсах и ангидритах за счет поступления слабоминерализованных атмосферных осадков и подземных вод из вмещающих карбонатных и терригенных пород. Подземные полости либо отсутствуют, либо развиты незначительно.
III – относительно устойчивая	Значительная мощность перекрывающих терригенных кунгурских пород и глинистых четвертичных осадков. Кровля гипсов располагается ниже уровня подземных вод, имеющих высокую минерализацию. Слабая закарстованность, характеризуется мелкими кавернами, порами, размытыми трещинами.
IV – устойчивая	Карстующиеся гипсы и ангидриты отсутствуют.

Н.Х. Логиновым [94] предложена классификация территорий сульфатного карста Предуралья по устойчивости к провальным деформациям земной поверхности (таблица 1.7). В ее основу положено изучение развития уже имеющихся поверхностных карстовых форм совместно с изучением подземных карстопроявлений, а также геоморфологические условия развития карста.

Таблица 1.7. Категории устойчивости территорий сульфатного карста Предуралья к провальным деформациям земной поверхности [94]

Категория устойчивости	Условия карстообразования
I – устойчивая	Провалы и другие карстовые явления на земной поверхности не наблюдаются. Потенциальные предпосылки для развития карста отсутствуют.
II – относительно устойчивая	Редкие карстово-суффозионные воронки на речных террасах и крупные впадины на участках затухающего карста водоразделов и склонов при отсутствии незаполненных подземных полостей.
III – неустойчивая	Пораженность территорий закарстованностью средняя и высокая. Имеются незаполненные полости в гипсах и ангидритах, а также в покрывающих породах.

Качественная оценка риска (опасности) возникновения провала предложена Р.Р. Kemmerly [236]. Ее основой является картографическое сопоставление молодых и древних провалов, анализ их взаимного расположения и ориентации в пространстве относительно региональных тектонических разломов. По результатам такой оценки автором предлагается выделять три категории карстоопасности:

1) высокая («high risk collapse») – древние и молодые провалы ориентированы вдоль сети разломов, на дне провалов развиты поноры, соединяющиеся с подземной системой пустот;

2) средняя («moderate risk collapse») – молодые провалы отсутствуют, древние провалы ориентированы вдоль сети разломов, природная влажность грунтов в буфере 3 м от провалов выше фоновой;

3) низкая («low risk collapse») – молодые провалы отсутствуют, древние провалы имеют произвольную ориентацию в пространстве, природная влажность грунтов в буфере 3 м от провала близка к фоновому значению.

Коллективом авторов [88] в 1997 г. выполнена оценка карстовой и суффозионно-карстовой опасности г. Москва. Основными принципами при районировании по степени карстовой опасности являются трещиноватость и закарстованность растворимых пород. Карстово-суффозионная опасность оценивалась в зависимости от инженерно-геологического строения покровной толщи отложений, с учетом гидрогеологических характеристик и карстопроявлений на поверхности.

Категории карстовой опасности характеризуются следующими признаками:

- весьма опасная категория – зоны повышенной трещиноватости в каменноугольной толще, к которым приурочены днища доюрской и доледниковых погребенных долин, карбонатные толщи интенсивно трещиноваты и неравномерно закарстованы: сильно разрушены, содержат много открытых и закольматированных полостей разного размера;

- опасная категория – карбонатные породы интенсивно и неравномерно закарстованы: сильно разрушены, содержат много полостей разного размера;

- малоопасная категория – карбонатные породы кавернозны и слаботрещиноваты.

Категории карстово-суффозионной опасности характеризуются следующими признаками:

- весьма опасная категория – закарстованная толща перекрыта песчаными породами, или в основании перекрывающей толщи залегает слабопроницаемый глинистый слой мощностью менее 10 м, и имеются критические значения напоров подземных вод; на земной поверхности встречаются провалы и оседания;

- опасная категория – закарстованная толща перекрыта песчаными породами, или в основании перекрывающей толщи залегает слабопроницаемый глинистый слой мощностью менее 10 м; избыточные напоры подземных вод имеют докритические значения, провалы и оседания земной поверхности отсутствуют;

- неопасная категория – мощность слабопроницаемых глинистых пород, перекрывающих закарстованную толщу, превышает 10 м; избыточные напоры подземных вод имеют докритические значения.

По этим же критериям В.М. Кутеповым, Н.Г. Анисимовой и др. [89] выполнена оценка карстово-суффозионной опасности на участке строительства третьего кольца автодороги в северо-западном районе г. Москвы.

Оценка карстопасности территории Великобритании произведена в результате комплексирования картографических слоев, содержащих разностороннюю информацию об особенностях природных условий развития карста [212]. В ходе анализа карт было выделено 6

основных и 3 дополнительных факторов-показателей, влияющих на опасность его проявления. К основным показателям относятся: *литологический состав карстующихся пород, характер и мощность перекрывающих отложений, их фильтрационная способность, уклон рельефа поверхности земли, количество оледенений (ледниковых периодов)*. Среди дополнительных факторов исследовались следующие: *особенности подземного рельефа кровли карстующихся отложений, наличие ослабленных трещинных зон, а также территорий развития перекрытого карста*. Таким образом, исследуемые авторами показатели в той или иной мере затрагиваются различные аспекты природного строения. По общности природных условий, характеризующихся схожим набором факторов и их признаков, авторами выделены 5 типов участков с определенной степенью карстоопасности (таблица 1.8).

Таблица 1.8. Характеристика карстоопасных участков на территории Великобритании [212]

Степень карстоопасности	Основная характеристика
1 или А	Территории, в пределах которых присутствуют карстующиеся породы, но активизация карстового процесса возможна только при чрезвычайных условиях
2 или В	Территории широкого развития слаборастворимых карстующихся пород. Активизация карста и образование провалов и оседаний земной поверхности возможно только при значительном изменении гидрогеологических условий (увеличение поверхностного или подземного стока). В толще пород развиты единичные полости
3 или С	Территории широкого развития сильно растворимых карстующихся пород, либо залегающих на относительно больших глубинах, либо находящихся в гидрогеологических условиях, не благоприятствующих активизации карста. Провальные явления носят единичный характер, в толще породы развиты полости
4 или D	Территории широкого развития сильно растворимых карстующихся пород. Широко развита полостность и относительно высокое проявление поверхностных провальных форм карста.
5 или E	Территории широкого развития сильно растворимых карстующихся пород. Широко развита полостность и большое количество провальных форм карста на поверхности земли.

Комплексное районирование территории г. Москвы по степени карстоопасности согласно [2] предлагается осуществлять с учетом 7 факторов, характеризующих структурно-тектонические, геолого-гидрогеологические, геоморфологические и инженерно-геологические условия развития карста, а также степень закарстованности (таблица 1.9). Адаптированный вариант данной методики был применен И.А. Соколовой [138] при оценке карстоопасности территории Заречной части Нижнего Новгорода. Всего в ходе районирования было выделено три категории карстоопасности: опасная, потенциальная опасная и неопасная. Отнесение каждого определенного участка исследуемой территории к тому или иному району опасности осуществлено, исходя из принципа: если не удовлетворяется хотя бы один признак опасного района, то участок является потенциально опасным. Характеристика категорий опасности приведена в таблице 1.10.

Таблица 1.9. Факторы возможного провалообразования [2, 138]

г. Москва	Заречная часть г. Н. Новгород
1. Положение участков в зоне тектонических нарушений	1. Наличие ослабленных тектонических зон повышенной трещиноватости пород
2. Положение участков в пределах древних погребенных речных долин и особенно доледниковых	2. Наличие участков эрозионного размыва в пределах пра-Волги
3. Интенсивная вертикальная фильтрация подземных вод, связанная с нарушением их режима и разностью напоров водоносных горизонтов	3. Вертикальная фильтрация подземных вод в зонах техногенных нагрузок и в местах гидравлической связи грунтовых и трещинно-карстовых вод
4. Отсутствие водоупоров или незначительная их мощность	4. Наличие водоупора переменной мощности
5. Наличие в известняках карстовых полостей без заполнителя, со слабым заполнителем, большая выветрелость известняков, вплоть до глыб, щебня и муки	5. Наличие в растворимых породах полостей без заполнителя, заполненных водой или слабым, рыхлым материалом. Карстующиеся породы местами разрушены до состояния щебня, дресвы, песка и муки. Полости в глинистом водоупоре, перекрывающем карбонатные и сульфатные породы
6. Наличие в известняках переотложенных грунтов более позднего возраста	6. Наличие в известняках, гипсах и ангидритах полостей, заполненных переотложенным материалом более позднего возраста
7. Особое состояние и свойства четвертичных песчано-глинистых материалов (разуплотненные зоны, нарушенные слои по отношению к соседним участкам и т.д.)	7. Наличие ослабленных зон в песчаной толще

Таблица 1.10. Принципы районирования Заречной части Нижнего Новгорода по карстовой опасности [138]

Районы	Признаки
Опасный	Наличие в кровле карстующихся пород полостей, высотой более 0,5 м, заполненных водой или переотложенным материалом, а так же зон сильновыщелоченных пород. Наличие полостей в татарских отложениях. Отсутствие водоупора, перекрывающего растворимые породы, или его недостаточная мощность, не превышающая 5 м. Градиент вертикальной фильтрации более 3. Присутствие на земной поверхности карстовых воронок и провалов.
Потенциально опасный	Наличие в кровле карстующихся пород единичных полостей, высотой менее 0,5 м, заполненных водой или переотложенным материалом. Наличие водоупора, перекрывающего растворимые породы, мощностью от 5 до 10 м. Градиент вертикальной фильтрации менее 3.
Неопасный	Наличие водоупора мощностью более 10 м, перекрывающего растворимые породы

Дифференциация территории Земли Гессена (Германия) по категориям с различным потенциалом карстовой опасности осуществлена в масштабе 1:200000 в зависимости от следующих факторов [26]: 1) наличие способных к карстованию пород, а также глубина их расположения, степень закарстованности и характер из воздействия на земную поверхность; 2) задокументированные карстопроявления (провалы и мульды оседания), а также повреждения сооружений; 3) обоснование геотехнических проблем; 4) возраст и активность карстопроявлений; 5) соотношение залегания пластов (глубина расположения карстующихся пород с различной геометрией провалов) и связь их с провалами и мульдами оседания; 6) строительно-техническая оценка территории, осуществляемая по данным об ориентации провалообразования, диаметрам и глубинам провалов, частоте их образования, а также доли площади поражения 1 км² мульдами оседания.

Оценка рассматриваемых факторов осуществлена автором качественным способом. Всего было выделено 11 категорий опасности, отраженных на карте района (таблица 1.11). Карта карстоопасности, построенная по результатам районирования по качественным признакам сопровождается картой плотности провалов и мульд оседания. Их сопоставление позволяет давать количественно характеристику распределения карстопроявлений по категориям опасности. Наибольшая плотность провалов отмечается в пределах категорий опасности 3 и 7, несколько реже провалы представлены в категориях 4, 5 и 6.

Таблица 1.11. Категории карстовой опасности в районе Гессена [26]

Категория карсто-опасности	Карстующиеся породы	Характеристика категорий карстоопасности относительно поверхностных карстовых форм
1	Нет	Карстующиеся породы отсутствуют.
2		Проявления карбонатного, сульфатного и соляного карста не следует ожидать на поверхности (на основании известных геологических условий). Однако отдельные случаи провалов не могут быть исключены.
3	Карбонаты (Muschelkalk)	Встречаются современные провалы. Диаметры провалов 1-4 м, глубины 1-3 м. Высоты полостей 2,5-3 м. Опасность обрушения пород незначительна ввиду небольших размеров провальных форм.
4	Сульфаты (Zechstein, Rot, Средний Muschelkalk)	Современные провалы почти невероятны, так как карстование еще прогрессирует или уже закончено. Встречаются древние провалы различных размеров. Заполнитель провальных впадин чувствителен к осадкам. Подземные полости имеют высоты от нескольких метров до 70 м. Опасность обрушения пород очень незначительна ввиду наличия мощного покрова (более 50 м).
5	То же	Современные провалы часты при открытом и неглубоком карсте в области выклинивания сульфатов на поверхность. Диаметры провалов 1-4 м, глубины 1-4 м. опасность обрушения пород высокая.
6	То же	Современные провалы часты в монолитных породах при покрытом сульфатном карсте (Zechstein). Большая первоначальная мощность сульфатов. Диаметры провалов от 1 и до более 80 м. Высокая опасность обрушения пород.
7	То же	Современные провалы часты в монолитных породах при покрытом сульфатном карсте (Rot, Средний Muschelkalk).
8	Хлориды (Zechstein)	Современные мульды оседания почти невероятны, т.к. карстование в области верхней поверхности соляной залежи почти закончено. Часто встречаются древние мульды очень больших размеров, которые заполнены чувствительными к осадкам отложениями. Значительное разрыхление пород. Опасность оседания пород небольшая.
9	То же	Современные мульды оседания встречаются часто, т.к. имеет место активное карстование соляной залежи в области внутреннего склона. Образование оседания, а также трещин растяжения и провалов во внешней области мульды. Опасность оседания и обрушения породы очень высока.
10	То же	Соляная толща не затронута растворением. Возможно образование современных провалов вследствие нерегулярного карстования.
11	То же	Достоверные сведения отсутствуют. Имеется опасность карстопроявлений во внешней области соляного склона.

Каждая категория карстоопасности характеризуется оценкой возможных геотехнических проблем, которые могут возникнуть при хозяйственном освоении закарстованных территорий. На основании такой характеристики для каждой категории даны рекомендации по применяемым мероприятиям (изыскания, закрепление оснований, усиление конструкций, контроль за карстоопасностью), а также затратам на их осуществление. Даны отдельные рекомендации по

противокарстовым мероприятиям для разных видов строительства (промышленного, гражданского, мелиоративного и т.д.). В итоге результаты районирования территории Гессена по степени карстоопасности являются комплексной программой, использование которой позволяет принимать эффективные решения при проектировании новых объектов инфраструктуры.

В Пермском крае действующими строительными нормами [22] регламентируется определение категории устойчивости территории по интенсивности провалообразования в условиях недостатка информации для осуществления прямого расчета. В данном случае предлагается пользоваться комплексом признаков, в число которых входят косвенные методы оценки, ориентированные на анализ природных условий развития карста, а также некоторые количественные показатели закарстованности (таблица 1.12). Определение категории устойчивости производится экспертным методом на основании их взаимного сопоставления.

Таблица 1.12. Основные критерии оценки устойчивости закарстованных территорий [22]

Категории закарстованных территорий по интенсивности карстовых деформаций					
I	II	III	IV	V	VI
	Граница проводится ориентировочно в 20-50 м от краев отдельных провалов, воронок, их небольших групп, карстово-эрозионных впадин		Граница проводится в 100-200 м от краев отдельных провалов, воронок, их небольших групп, карстово-эрозионных впадин		Территории, где образование карстовых деформаций поверхности и грунтов активной зоны основания сооружения исключается вследствие отсутствия одного или нескольких обязательных условий развития карста или возможности их проявления из-за наличия надежной (и в изменяющейся под воздействием техногенных факторов обстановке) нерастворимой, как правило, водонепроницаемой покровной толщи в соответствующих геолого-структурных условиях. Надежность защитной толщи определяется не только высокой плотностью пород и ничтожной водопроницаемостью (коэффициент фильтрации $\leq 0,001$ м/сут), но ее мощностью (обычно более 10-20 м), но не менее $1/5$ действующего на нее напора.
площади каждой воронки и карстово-эрозионной впадины и в радиусе 20-50 м от них. Возможно уточнение детальной разведкой.	В зависимости от конкретных условий : выявленные буровыми и (или) : геофизическими работами участки (зоны) : сильной или средней закарстованности с : полостями, которые могут проявиться на : поверхности, при вскрытии скважиной : полости (но без ее оконтуривания) площадь : в радиусе 20-50 м (от скважины) в : зависимости от степени ее опасности (в : частности, от глубины залегания и : вертикального размера). Зоны (на стадии рабочего проектирования) наличия полостей в зависимости от их опасности (глубины нахождения и размеров, степени заполнения, состава и плотности заполнителя, его суффозионной устойчивости и гидрогеодинамических условий, техногенных факторов, критерия степени опасности, определяемого аналитическими и экспериментальными методами и др.). Учитываются ослабленные, разуплотненные и разрушенные интервалы как в карстующихся, так и покровных отложениях, особенно в активной зоне основания.			Территории, где карстовые деформации с известным возрастом, воронки, карстово-эрозионные впадины и полости не выявлены, но возможность их наличия и образования за расчетный срок службы сооружения не исключается. По косвенным показателям (в частности по коэффициенту зональности, геохимическим данным и др.) возможно выделение подкатегорий.	
Показатели закарстованности по ТСН 302-50-95 РБ (в скобках – по райцентру Усть-Кишерть Пермского края) *					
$\rho > 100$	$\rho = 100-10 (>80)$	$\rho = 10-1 (80-30)$	$\rho = 1-0,1 (<30)$	$\rho = 0,1-0,01$	
$K_s = 100$	$K_s = 100-10 (>7,5)$	$K_s = 10-5 (7,5-4)$	$K_s = 5-1 (<4)$	$K_s < 1$	
	$K_v > (15)$	$K_v = (15-10)$	$K_v < (10)$		
	$\rho_p > (0,5)$	$\rho_p = (0,5-0,15)$	$\rho_p < (0,15)$		
	$\rho_H > (25)$	$\rho_H = (25-10)$	$\rho_H < (10)$		
$R = \text{провал}$	$R = \text{один диаметр от провала (для воронок)}$	$R < 100$	$R = 100-250$	$R > 250$	

Примечание: ρ – плотность карстовых воронок, шт./км²; K_s – коэффициент площадной закарстованности, %; K_v – коэффициент объемной закарстованности, см; ρ_p – площадная плотность карстовых полостей, шт./га; ρ_H – плотность карстовых воронок с показателем глубинности более 0,3, шт./км²; R – удаленность от ближайшего поверхностного карстового проявления, м.

Качественную оценку согласно [22] рекомендуется осуществлять на стадиях разработки предпроектной документации и проектов малоответственных (а в ряде случаев и нормального уровня ответственности) объектов. При этом помимо собственно категорий устойчивости следует выделять категории карстоопасности (таблица 1.13).

Таблица 1.13. Качественная оценка карстоопасности закарстованных территорий [22]

Степень опасности закарстованной территории	Категории устойчивости территорий относительно интенсивности карстовых деформаций (провалов)
Опасная	I – III
Потенциально опасная	III – V
Практически неопасная	V – VI

В.Н. Катаев [68] качественную оценку карстоопасности предлагает осуществлять в результате многоуровневого районирования. В соответствии с логикой организации карстующихся массивов им выделяется три масштабных уровня исследования (таблица 1.14):

- А. Глобальный;
- Б. Региональный;
- В. Локально-блоковый.

Каждый уровень соответствует определенным рангам таксонометрического деления: глобальный – высшему, на котором выделяются карстовые страны и провинции; региональный – среднему, соответствующему карстовым областям и районам; локально-блоковый – низшему. Инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий зачастую ограничивается исследованиями в рамках локально-блокового уровня организации.

Конкретному уровню исследования соответствуют определенные показатели природных условий, характерные только для этого уровня. В пределах каждого уровня целесообразно выделение групп показателей по генетико-морфологической принадлежности, определяющей те или иные условия: геоструктурные, тектонического режима, литологические, гидродинамические, геоморфологические, антропогенные (техногенные). Показатели каждой группы обуславливают неоднозначную степень (потенциальную возможность) карстопроявлений: низкую (I), среднюю (II), высокую (III), очень высокую (IV). Выделение групп показателей качественной идентификации степени карстоопасности или включение признаков в ту или иную подгруппу определяется на основе практики исследования конкретной территории.

Карстовая опасность, по мнению В.Н. Катаева, должна оцениваться по результатам комплекса инженерно-геологических, геоморфологических, геофизических изысканий. При этом следует учитывать существующие и возможные в будущем техногенные воздействия на геологическую среду, влияющие на активизацию карстовых и карстово-суффозионных процессов; расчетный срок эксплуатации объектов; конструктивные особенности сооружений;

характер реагирования сооружений на прогнозируемые карстовые деформации; вероятные последствия экономического, экологического и социального характера при повреждении.

Таблица 1.14. Признаки качественной оценки карстоопасности [68]

Уровни организации карстовых массивов (ранг таксонов)	Вероятность карстопроявлений			
	низкая (I)	средняя (II)	высокая (III)	очень высокая (IV)
1	2	3	4	5
А ГЛОБАЛЬНЫЙ (высший: страна, провинция)	1. Геоструктурные			
	а) выступы фундамента	а) платформенные структуры I порядка б) крылья синеклиз и антеклиз	а) зоны складчатости б) внешние зоны антиклинориев в) блоковые зоны сочленения структур I порядка (платформ и прогибов) г) зоны глубинных разломов	а) сейсмоструктурные пояса б) пересечения глубинных разломов
2. Литологические				
а) карбонаты платформенных (современных морских и континентальных обстановок)		б) сульфаты и галоиды переходных, карбонаты переходных обстановок		
Б РЕГИОНАЛЬНЫЙ (средний: область, район)	1. Геоструктурные			
	а) внутренние антиклинории	а) синклинальные зоны б) депрессии в) своды г) крылья крупных отрицательных структур II порядка	а) валы б) зоны сочленения структур II-III и IV порядков в) зоны региональных разломов	а) внешние антиклинории б) межгорные впадины в) пересечения региональных разломов г) зоны надвиговых нарушений д) сейсмоактивные разломы
	2. Тектонического режима			
	а) устойчивое опускание территории	а) нейтральный тектонический режим	а) чередование режимов поднятия и опускания территории	а) устойчивое поднятие территории
	3. Литологические			
	<i>Литология карстующихся отложений</i>			
	а) прослои и линзы карбонатных, сульфатных, галоидных пород среди некарстующихся	а) карбонаты, их переслаивание с некарстующимися породами	а) сульфаты, переслаивание сульфатов и карбонатов	а) галоиды, переслаивание галоидов и сульфатов
	<i>Мощность и макротекстуры карстующихся отложений</i>			
	а) маломощные, тонкослоистые, плитчатые		а) средней мощности, среднеслоистые	а) мощные, толстослоистые
	<i>Литология и тип перекрывающих отложений</i>			
	а) водоупорные, плотные глины, массивные скальные не трещиноватые породы	а) глинистые и суглинистые с поровой проницаемостью рыхлого сложения	а) выветрелые коренные скальные, полускальные с трещинной проницаемостью б) обвално-карстовые	а) песчаные, слабосвязные и несвязные с поровой проницаемостью, почвы
	<i>Мощность перекрывающих отложений</i>			
	а) мощные – более 50 м	а) относительно мощные – 31-50 м	а) маломощные – 11-30 м	а) тонкие покровы – 1-10 м или их отсутствие
	<i>Тип сочетания карстующихся и перекрывающих отложений, их контакты</i>			
	а) покрыто-перекрытый	б) перекрытый	а) покрытый	а) открытый
	б) приповерхностные зоны контактов карстующихся и некарстующихся пород			
4. Гидродинамические				
а) область транзита карстовых вод				
б) зона глубинной циркуляции карстовых вод	б) зона горизонтальной циркуляции карстовых вод	а) область питания карстовых вод б) зона вертикальной нисходящей циркуляции карстовых вод	а) область разгрузки карстовых вод б) зона сифонной циркуляции карстовых вод в) зона колебаний уровней карстовых вод	
В ЛОКАЛЬНО-БЛОКОВЫЙ (низший)	1. Геоструктурные			
	а) осевые зоны синклиналей б) центральные части межразломных и межтрещинных блоков	а) крылья синклинальных и антиклинальных складок б) фрагменты региональных разломов в) переклинали и центриклинали мелких, осложняющих (вторичных) складок г) зоны дробления	а) сводовые части неотектонических поднятий б) осевые зоны линейных антиклиналей в) локальные активизированные разломы г) участки сейсмоактивных разломов	а) периферийные зоны межразломных и межтрещинных блоков б) пересечения локальных активизированных разломов в) трещины бортового отпора г) зоны трещиноватости
	2. Литологические			
	<i>Вещественные различия карстующихся пород</i>			
	а) песчаные	а) кремнистые, глинистые (глина, двуокись кремния до 30 %)	а) чистые	а) очень чистые
	<i>Структурно-текстурные особенности карстующихся пород</i>			
	а) микрозернистые, мелкозернистые, плотные	а) среднезернистые, пористые, слаботрещиноватые	а) крупнозернистые, пористо-кавернозные, трещиноватые	а) грубозернистые, пористо-кавернозные, сильнотрещиноватые
	3. Геоморфологические			
	а) древние водоразделы б) высокие террасы	а) русла рек б) низкие террасы	а) переуглубленные долины б) склоны речных террас	а) лога б) суходолы
	<i>Макрорельеф кровли карстующихся пород</i>			
	а) вершины останцов	а) склоны останцов	а) межостанцовые седловины	а) линейно вытянутые понижения (лога)
	4. Гидродинамические			
	а) глубокое залегание горизонта карстовых вод	а) участки гидродинамической связи поверхностных и подземных вод	а) интенсивная вертикальная фильтрация из горизонта грунтовых вод в карстовые	а) участки динамического изменения уровней подземных вод б) вертикальные и латеральные зоны локализации подземного стока

Приведенные в таблице 1.14 признаки были использованы В.Н. Катаевым [68] при среднемасштабном районировании юга Пермской области. В пределах оцениваемой территории им выделено пять районов (3 низкой степени карстоопасности, 1 высокой, 2 – очень высокой степени карстоопасности), расположение которых соответствует ориентировке геоструктурных границ первого порядка и простиранию литологически разнородных зон. В пределах районов выделены участки с различной степенью карстоопасности (практически безопасные, низкой степени карстоопасности, средней степени карстоопасности, высокой степени карстоопасности).

1.3.2. Полуколичественные оценки

В инженерном карстоведении интегральные оценки карстоопасности часто осуществляются *балльным методом* в результате комплексирования различных факторов природно-техногенных условий и их совместного рассмотрения в совокупности с показателями закарстованности. Это наиболее простой и технически доступный количественный способ получения обобщенной оценки, результатом которой является некоторый количественный параметр – суммарный балл, значения которого свидетельствуют об уровне опасности проявления карста. Однако ввиду субъективного назначения баллов экспертным способом определенным значениям или признакам исследуемых факторов данные оценки не являются в полной мере количественными.

Первые полуколичественные балльные методики интегральной оценки опасности проявления карста в зависимости от особенностей природных условий (литолого-стратиграфических, гидрогеологических условий, топографии и геоморфологии и пр.) и закарстованности были предложены в конце 1970-х начале 1980-х гг. Эти разработки связаны, главным образом, с именами американских карстоведов [196, 205, 206, 215, 232, 249]. Основные результаты их исследований обсуждались в рамках четырех мультидисциплинарных конференций (1984, 1987, 1989 и 1993 гг.) по проблемам провалообразования и инженерного карстоведения и опубликованы в соответствующих сборниках трудов под общей редакцией Barry F. Beck.

В отечественном карстоведении балльный метод к оценке карстоопасности одними из первых применили В.Н. Дублянский и Г.Н. Дублянская. При инженерно-геологической оценке закарстованных территорий ими предлагается в качестве методологической основы использовать учение Д.С. Соколова об основных условиях развития карста [49]. Предлагаемая система основана на ранжированных оценках факторов, составляющих четыре условия развития карста – растворимость, водопроницаемость пород, наличие движущейся воды и ее

агрессивность. Например, при построениях на локальном масштабном уровне В.Н. Дублянским, В.И. Клименко и А.Н. Михайловым [52] были выделены и ранжированы по баллам 19 факторов развития карста (рисунок 1.3).

I. Наличие растворимых пород		II. Наличие водопроницаемости		III. Наличие движущейся воды		IV. Наличие агрессивных свойств воды	
Содержание нерастворимого остатка, %	Балл	Угол падения пород, градус	Балл	Количество эффективных осадков, мм	Балл	Минерализация воды в условиях карбонатной (сульфатной) карстующейся толщи, мг/дм ³	Балл
<3	5	<5	3	<500	1	<100 (500)	1
3 – 5	4	5 – 10	4	500 – 1000	2	100 – 200 (500 – 1000)	2
6 – 8	3	11 – 50	5	1001 – 1500	3	201 – 300 (1001 – 1500)	3
9 – 11	2	51 – 70	4	1501 – 2000	4	301 – 400 (1501 – 2000)	4
>11	1	>70	3	<2000	5	>400 (2000)	5
Содержание SiO ₂ , %	Балл	Количество тектонических нарушений на 0,25 км ² , шт.	Балл	Количество конденсационных вод, % от количества эффективных осадков	Балл	pH воды	Балл
<40	1	<1	1	<5	1	<5,0	5
40 – 60	2	1 – 2	2	5 – 10	2	5,0 – 6,5	4
>60	3	3 – 4	3	>10	3	6,6 – 7,5	3
Мощность карстующихся карбонатных (сульфатных) отложений, м	Балл	5 – 6	4	Местный поверхностный сток, формирующихся на некарстующихся породах и величина перепада из других водоносных горизонтов, % от количества эффективных осадков	Балл	7,6 – 9,0	2
<10 (1)	1	>6	5	<10	1	>9,0	1
n-10 (n-1)	2	Объемная плотность трещин	Балл	11 – 20	2	Температура воды, градус, и ее растворяющая способность по отношению к карбонатным (сульфатным и галонидным) породам	Балл
n-100 (n-10)	3	<10	1	21 – 30	3	<5	5 (1)
n-1000 (n-100)	4	10 – 50	2	31 – 40	4	5 – 10	4 (2)
Мощность перекрывающих отложений, м	Балл	51 – 100	3	>40	5	11 – 15	3 (3)
<1	5	>100 – 6	4	Отношение перепада высот между областью питания и выходами источников, дренирующих массив, к расстоянию между ними по прямой, д.е.	Балл	16 – 20	2 (4)
1 – 10	4	Степень раскрытия трещин	Балл	<0,05	1	>20	1 (5)
11 – 30	3	<0,1	1	0,05 – 0,10	2	Распространение карстующихся пород по площади*, д.е.	Балл
31 – 50	2	0,1 – 0,5	2	0,11 – 0,20	3	<0,2	1
>50	1	0,6 – 1,0	3	0,21 – 0,30	4	0,2 – 0,3	2
Пористость и кавернозность карбонатных (сульфатных) пород	Балл	>1,0	4	>0,30	5	0,4 – 0,5	3
<5	1	Структурно-тектонические условия	Балл	Складчатая структура	2	0,6 – 0,7	4
5 – 10	2	Блоковая структура	3	Блоковая структура	3	>0,7	5
11 – 15	3						
16 – 20	4						
>20	5						

* Та же классификация используется для распространения карстующихся пород в

Рисунок 1.3. Факторы природных условий к оценке картоопасности на локальном масштабном уровне [52]

Впоследствии авторы адаптировали набор оцениваемых факторов природного строения к региональным исследованиям условий развития карста на территории Украины. Для этого ими был пересмотрен и добавлен ряд факторов опасности, а также изменены принципы шкалирования некоторых из них. В итоге на региональном масштабном уровне Г.Н. Дублянская и В.Н. Дублянский [49] выделяют 20 ведущих факторов, соотносящихся с четырьмя основными условиями развития карста (рисунок 1.4).

Г.Н. Дублянская и В.Н. Дублянский предлагают два балльных подхода к оценке карстоопасности, называемые ими *интегральным* и *дифференциальным методами*.

Интегральный метод оценки карстоопасности заключается в сопоставления суммарной балльной оценки в пределах исследуемой территории с оценочными построениями, полученными по общепринятым показателям развития карстовых форм (плотность карстовых форм, интенсивность провалообразования и т.д.). Такое сопоставление реализуется с

применением корреляционно-регрессионного анализа, в результате чего появляется возможность прогнозировать развитие карстовых форм по количеству баллов. Например, для территории Украины была установлена достаточно тесная связь (коэффициент корреляции равен 0,61) между суммарной балльной оценкой x по всем факторам и плотностью распространения карстовых форм ρ , которая выражается следующей зависимостью:

$$\rho = 0,0036e^{0,18x} \quad (1.49)$$

I. Наличие растворимых пород		II. Наличие водопроницаемости		III. Наличие движущейся воды		IV. Наличие агрессивных свойств воды	
Распространение карстующихся пород по площади*, д.е.	Балл	Структурно-тектонические условия	Балл	Количество эффективных осадков, мм	Балл	Минерализация, г/дм ³	Балл
1,0 – 0,8	5	Складчатые сооружения	5	>400	5	<0,2	5
0,8 – 0,6	4	Синклинории на щите	4	400 – 300	4	0,2 – 0,5	4
0,6 – 0,4	3	Впадины и прогибы	3	300 – 200	3	0,6 – 1,0	3
0,4 – 0,2	2	Склоны щита	2	200 – 100	2	1,1 – 1,5	2
<0,2	1	Блоки щита и антеклизы	1	<100	1	1,6 – 2,0	1
* Та же классификация используется для распространения карстующихся пород в разрезе		Угол падения пород в пределах платформ (геосинклиналей), градус	Балл	Количество конденсационных вод, % от количества осадков	Балл	pH воды	Балл
Мощность карстующихся карбонатных (сульфатных и галонидных) отложений, м	Балл	<5	3 (5)	15 – 11	3	5,0 – 6,9	4
>500 (50)	5	5 – 10	4 (5)	10 – 6	2	7	3
500 – 100 (50 – 30)	4	11 – 30	5 (4)	5 – 1	1	7,1 – 9,0	2
100 – 50 (30 – 10)	3	31 – 50	5 (4)	Поверхностный сток в геосинклинальных (платформенных) областях, л/с·км ²	Балл	Среднегодовая температура воздуха на поверхности, градус, в пределах территорий развития карбонатных (сульфатных и галонидных) пород	Балл
50 – 10 (10 – 5)	2	51 – 70	4 (3)	>20 (4,0)	5	5,0 – 6,0	5 (1)
<10 (5)	1	>70	2 (2)	20 – 16 (4,0 – 3,1)	4	6,1 – 7,0	4 (2)
Степень относительной карстуемости по площади*	Балл	Расстояние от крупных тектонических нарушений в долях радиуса вписанной в операционных квадрат окружности, д.е.	Балл	15 – 11 (3,0 – 2,1)	3	7,1 – 8,0	3 (3)
Галонидные породы	5	<0,2	5	10 – 6 (2,0 – 1,1)	2	8,1 – 9,0	2 (4)
Сульфатные породы, чередующиеся с галондами	4	0,2 – 0,4	4	<6 (1,1)	1	9,1 – 10,0	1 (5)
Карбонатные породы, их переслаивание с сульфатами и галондами	3	0,5 – 0,6	3	Подземный сток в геосинклинальных (платформенных) областях, л/с·км ²	Балл	Дополнительным баллом оценивается увеличение растворяющей способности при формировании углекислоты почвой, наличии органических кислот, наличии в растворе одноименных ионов, подтоке сухих струй CO ₂ , окислении сульфидов, наличии коррозии смешивания и прочих условия.	
Глинистые, песчаные карбонатные породы, их переслаивание с некарстующимися породами	2	0,7 – 0,8	2	>8 (3,5)	5		
Прослои карстующихся пород среди некарстующихся	1	0,8 – 1,0	1	8 – 7 (3,5 – 2,6)	4		
* Та же классификация используется для распространения карстующихся пород в разрезе		>1,0	0	6 – 5 (2,5 – 1,6)	3		
Тип карста	Балл	Характер коллекторов	Балл	4 – 3 (1,5 – 0,6)	2		
Открытый	5	Поровый	1	<3 (0,6)	1		
Покрытый	4	Трещинный	2	Превышение водоразделов над гальвегами, м	Балл		
Перекрытый	3	Кавернозный	3	>100	5		
Перекрыто-покрытый	2	Смешанный двойной	4	100 – 80	4		
Участки открытого и покрытого	1	Смешанный тройной	5	80 – 60	3		
		Неотектонический режим геосинклинальных (платформенных) областей, м	Балл	60 – 40	2		
		Более +1000 (+500)	5	40 – 20	1		
		+1000...+500 (+200...+100)	4	<20	0		
		+500...-500 (+100...-100)	3				
		-500...-1000 (-100...-200)	2				
		Более -1000 (-200)	1				

Рисунок 1.4. Факторы природных условий к оценке картоопасности на региональном масштабном уровне [49]

Одна из первых интегральных оценок карстоопасности была осуществлена авторами на примере карстовых массивов Большого Сочи.

Дифференциальный метод оценки карстоопасности основан на сопоставлении балльной оценки природных условий развития карста с особенностью его техногенной активизации под влиянием разнообразной хозяйственной деятельности, также выраженной балльным способом. Всю совокупность исследуемых на территории Украины факторов техногенного влияния авторы подразделяют на 5 групп (рисунок 1.5).

Оценка карстоопасности осуществляется по соотношению условий развития карста и его техногенной активизации в результате матричного сопоставления их категорий. Для этого выделяется 4 категории по условиям развития карста и техногенной активизации, каждая из которых соответствует определенному интервалу баллов. В результате такого сопоставления выделяется 5 категорий по степени карстоопасности: I – низкая, II – средняя, III – высокая, IV – очень высокая, V – катастрофическая (таблица 1.15).

1. Сельскохозяйственная деятельность		2. Лесохозяйственная деятельность		4. Горнодобывающая деятельность	
Распашка пахотных земель, % от занимаемой ими площади	Балл	Вырубка леса, % деловой древесины в составе лесов	Балл	Включает открытые работы, подземные работы, подземную выплавку и выщелачивание полезных ископаемых. Оценивается по соответствующим картам по величине пунсона (трехбалльная шкала).	
>70	3	>50	3		
70 – 30	2	50 – 30	2		
<30	1	<30	1		
Выпас скота в единицах живого веса на единице площади, т/га	Балл	Лесопосадки	Балл	5. Водохозяйственная деятельность	
>40	3	Сплошные	2	Плотность населения, чел./км ²	Балл
40 – 30	2	Разряженные	1	>80	3
<30	1			80 – 40	2
				<40	1
Осушительные и оросительные мелиорации	Балл	3. Строительная деятельность		Централизованное водоснабжение по размещению крупных городов, выраженное в тыс. жителей	
Сплошное орошение	3	Промышленное, гражданское, гидротехническое строительство оценивается по соответствующим картам по величине пунсона (трехбалльная шкала), коммуникационное – по толщине знака грузопотока (трехбалльная шкала).		>300	3
Разряженное орошение	2			300 – 30	2
Разряженное орошение без борьбы с эрозией	1			<30	1
Массовое осушение заболоченных земель	2				
Осушение избыточно-увлажненных почв	1				

Рисунок 1.5. Факторы техногенных условий к оценке карстоопасности на региональном масштабном уровне [49]

Верификация итоговой модели карстоопасности, построенной дифференциальным методом, производится по результатам наложения на нее сведений о фактических аварийных ситуациях, авариях и катастрофах, связанных с карстом.

Таблица 1.15. Матрица для определения степени карстоопасности территории Украины [49]

Условия развития карста (баллы)	Техногенная активизация карста (баллы)			
	Слабая (менее 15)	Средняя (15 – 20)	Сильная (21 – 25)	Очень сильная (более 25)
Неблагоприятные (менее 40)	I	I	II	II
Слабоблагоприятные (40 – 50)	II	II	III	III
Среднеблагоприятные (51 – 60)	II	III	III	IV
Благоприятные (61 – 70)	III	III	IV	IV
Весьма благоприятные (более 70)	III	IV	IV	V

В 1998 Г.Н. Дублянская и В.Н. Дублянский [50] к вышеизложенному дифференциальному методу предложили унифицированную матрицу для определения степени карстоопасности в пределах любой территории независимо от масштабного уровня исследования и при любом наборе исследуемых факторов природных условий развития и техногенной активизации карста (таблица 1.16). Общий принцип построения данной матрицы не изменился, однако при выделении категорий по условиям и техногенной активизации развития карста авторами предлагается использовать статистические закономерности, связанные с нормальным законом

распределения. Для этого статистическому анализу подвергается вся совокупность суммарных балльных оценок в пределах различных участков, выделенных на исследуемой территории, полученных отдельно для *природных условий развития карста* x и для условий его *техногенной активизации* y . Для каждого из двух случаев оценивается среднее значение балльных оценок (x_{cp} и y_{cp}), а также их среднеквадратическое отклонение (σ_x и σ_y) в рамках всей исследуемой территории. По известным статистическим характеристикам на базе широко известного в математической статистике правила «трех сигм» или трех среднеквадратических отклонений выделяются интервалы значений балльных оценок, соответствующие конкретным категориям природных условий развития карста или его техногенной активизации.

Вследствие увеличения количества категорий по степени техногенной активизации карста ранжирование степеней карстоопасности и их наименование несколько изменено. Выделяется 5 категорий карстоопасности: I – очень низкая, II – низкая, III – средняя, IV – высокая, V – очень высокая (таблица 1.16). Заметим, что в одном из последних изданий авторы методики не выделяют последнюю V категорию, характеризующуюся очень высокой степенью карстоопасности [67].

Таблица 1.16. Унифицированная матрица для определения степени карстоопасности территорий [50, 67]

Условия развития карста (баллы)	Техногенная активизация карста (баллы)				
	Очень слабая (менее $y_{cp} - 2\sigma_y$)	Слабая ($y_{cp} - 2\sigma_y$)	Средняя ($y_{cp} \pm \sigma_y$)	Сильная ($y_{cp} + 2\sigma_y$)	Очень сильная (более $y_{cp} + 2\sigma_y$)
Неблагоприятные (менее $x_{cp} - 2\sigma_x$)	I	I	II	II	III
Слабоблагоприятные ($x_{cp} - 2\sigma_x$)	I	II	II	III	III
Среднеблагоприятные ($x_{cp} \pm \sigma_x$)	II	II	III	III	IV
Благоприятные ($x_{cp} + 2\sigma_x$)	II	III	III	IV	IV
Весьма благоприятные (более $x_{cp} + 2\sigma_x$)	III	III	IV	IV	IV (V)

С применением унифицированной матрицы авторами неоднократно осуществлялись балльные оценки карстоопасности в пределах различных территориальных единиц. Например, рассмотренный подход был использован при районировании по степени карстоопасности территорий Равнинного Крыма, г. Симферополь, промышленной площадки в г. Севастополь [50]. В каждом отдельном случае применялся отдельный конкретный набор исследуемых факторов природно-техногенных условий, устанавливаемых в зависимости от масштабного уровня исследования и объектной ориентации решаемой задачи.

Нормативно закреплённая методика интегральной оценки карстоопасности применяется в республике Башкортостан, где действуют территориальные строительные нормы [24] (взамен

[11]), распространяющиеся на изыскания, проектирование, строительство и эксплуатацию зданий и сооружений на закарстованных территориях. Согласно этому документу, на устойчивость закарстованных территорий оказывает влияние комплекс показателей-факторов, сведенных в таблице 1.17. Эти факторы учитываются при районировании площадей по степени устойчивости. Оценку устойчивости предлагается проводить в три стадии: предпроектной документации, рабочего проекта и рабочей документации. В результате получается объемная статическая модель состояния оцениваемого карстового массива, дифференцированная на шесть категорий по степени устойчивости. Территории III и IV категории устойчивости, согласно методике ТСН 302-50-95 РБ на стадии рабочей документации дополнительно дифференцируются по степени карстовой опасности с выделением зон А, В и С по наличию или отсутствию карстовых полостей в массиве, их размерам и степени заполненности вторичным материалом [25].

Таблица 1.17. Признаки и критерии оценки карстоопасности закарстованных территорий по категориям устойчивости [24]

№ п/п	Признаки	Категории устойчивости				
		I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6	7
I. На стадии предпроектной документации						
1	Среднегодовое количество карстовых провалов на 1 км ²	>1,0	1,0-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	<0,01
2*	Коэффициент закарстованности, ед.	>1,0	1,0-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	<0,01
3*	Плотность карстовых воронок, шт./км ²	>100	100-10	10-1	1,0-0,1	0,1-0,01
4*	Удаленность от ближайшего карстопроявления, м	Сам провал	Древние воронки, один диаметр от провала	<100	100-250	>250
5*	Глубина залегания карстующихся пород по данным бурения и геофизики:					
	5.1 трещиноватых и кавернозных, м	<35	<35	35-50	45-65	>60
	5.2 монолитных, м	<100	<100	50-70	55-75	>60
6	Наличие коррелируемых зон высоких градиентов Δq	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет
7	Наличие коррелируемых зон по биоокациации	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет
II. На стадии проекта (районирование закарстованных территорий по категориям устойчивости)						
1-7	Все признаки соответствующих категорий устойчивости на стадии предпроектной документации					
8*	Наличие карстовых полостей в карстующей толще и их характер по:					
	8.1 бурению	Открытые и заполненные		Заполненные, реже открытые	Заполненные каверны	Трещины, каверны
	8.2 геофизическим данным, в т.ч.			Реже открытые	Каверны	Каверны
	по параметру R_i	<0	<0	<0	>0	>0
	по параметру пористости n , %	>50	>50	30-50	20-30	<20
	по аномалиям потенциала МЗ	Интенсивные локальные от глубинных проводников			Заметные	Нет
	по аномалиям Δq	Интенсивные		Есть	Слабо интенсивные	Нет
	по аномалиям emanации радона	Интенсивные локальные		Локальные		Нет
	по локальным аномалиям биоокациации	Интенсивные локальные		Слабо локальные		Нет
9*	Наличие водоупоров в перекрывающей толще					
	9.1 мощность водоупора, м	Отсутствует или не более 1-2		Маломощные 5-20	Выдержанные 15-30	Преимущественно водоупорные
	9.2 надежность водоупора, характеризуемое УЭС, Ом (в скобках мощность водоупора для данного УЭС, м)	10-15 (1-2), 70-80 (5-10)		10-15 (5-20), 70-80 (15-30)	10-15 (15-30), 70-80 (30-50)	10-15 (30-50), 70-80 (60-70)
10*	Содержание пород, подверженных суффозии, %	>30		20-35	10-25	10

Продолжение таблицы 1.17

1	2	3	4	5	6	7
11	Наличие и мощность известково-доломитовой муки, м	>0,5		0,5-0,2	0,2	Нет
12	Загипсованность (содержание сульфатов) в породах перекрывающей толщи, %	>20		20-10	10-5	<5
13*	Наличие тектонических деформации в разрезе, характеризующихся признаками:					
	13.1 искаженность кривых ВЭЗ	Сильные		Заметные	Слабые	Нет
	13.2 зоны высоких градиентов q	Интенсивные		Заметные	Слабые	Нет
	13.3 протяженные аномалии биоЛокации	Есть	Есть	Есть	Нет (есть)	Есть
	13.4 узлокальные аномалии эманации радона	Есть	Есть	Есть	Нет (есть)	Есть
14*	Степень нарушенности карстующихся пород, характеризующаяся признаками:	Интенсивная		Значительная	Заметная	Слабая
	14.1 удельный коэффициент трещиноватости шт./м	>10		10-5	5-1	<1
	14.2 зоны аномалий по $R_f < 0$ (в % к площади изысканий)	100	70-100	50-70	30-50	<30
	14.3 аномальные зоны по S (продольная проводимость по отношению к средней)	Уменьшение в 2-3 раза		Уменьшение в 1,5 раза		Нет
	14.4 аномальные зоны по η_k (ворота), %	50-70		30-50	20-30	<20
	14.5 локальные аномалии Δq	Интенсивные		Заметные	Слабые	Нет
	14.6 наличие сейсморазведочных аномалий по МПВ. Искажение волновой картины (ИВК)	Явные		Заметные	Слабые	Нет
	14.7 уменьшение V_p , %	30-40		20-30	10-20	<10
	14.8 наличие зон разуплотнения (по ГГК-П)	Четко выраженные		Заметные	Слабые	Нет
	14.9 размеры каверн по стволу скважин, см	>10		5-10	2-5	<2
	14.10 коэффициент анитропизации (λ_k), ед.	>1,7		1,7-1,5	1,5-1,2	1,2
15*	Степень расчлененности кровли карстующихся пород (n , ед. и ΔH , м на 100 м)	>3 и >20-30		2 и 10-20	1 и 5-15	0 и 5-10
16*	Вертикальный градиент фильтрации, наличие восходящих (нисходящих) потоков карстовых вод:					
	16.1 по бурению, ед.	>6		6-2	2-1	<1
	16.2 по методу естественного поля (интенсивность аномалий U)	Интенсивные		Заметные	Слабые	Нет
17*	Гидравлический градиент, ед.	>0,01		0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
18*	Коэффициент фильтрации, м/сут	>50		50-25	25-5	<5
19*	Агрессивность карстовых вод (гипсовая емкость, г/л)	>1,5		1,5-1,0	1,0-0,3	<0,3
20*	Скорость подземной денудации, м ³ /км ² -год	>150		150-100	100-50	<50
21	Количество аномальных точек по основному методу, %	100-70		60-35	35-10	25-5
III. На стадии рабочей документации (зонирование по степени карстовой опасности)						
	Основные признаки, определяющие степень карстовой опасности			Зона А	Зона В	Зона С
1-21	Все признаки соответствующих категорий устойчивости на предыдущих стадиях			-	-	-
8	Характер вскрытых буровой скважиной карстовых полостей			Открытые	Заполненные	Зоны трещиноватости
22	Удаленность от карстовых полостей			Сама полость	До одного диаметра	Более одного диаметра
23	Линейный коэффициент внутренней закарстованности			>25	25-5	<5
24	Время достижения критических размеров полостями (по сравнению с амортизационным сроком службы сооружений)			Меньше	Соизмеримо	Многokrратно превышает
25	Ширина полости, м			>20	20-5	<5
26	Коэффициент устойчивости сводов, $2d/h$			>6	6-1	<1
27*	Наличие аномалий по методу заряда и МЗК			Локальные интенсивные	Заметные	Слабые, отсутствуют
28	Наличие сейсморазведочных аномалий по методу ВСП (уменьшение V_p в %, ИВК)			40-50, интенсивные	40-20, заметные	<20, слабые
29	Наличие локальных аномалий Δq по микрогравировке			Интенсивные локальные	Заметные локальные	Слабые, отсутствуют
30	Наличие эмационных аномалий			Интенсивные локальные	Заметные локальные	Слабые, отсутствуют
31	Наличие биоЛокационных аномалий			Интенсивные локальные	Заметные локальные	Слабые, отсутствуют
32	Активность карстового процесса в гипсах, %			>10	10-3	<3

Примечание: 1. Значения данного признака при наличии достаточной информации определяются через коэффициент закарстованности путем подбора соответствующего критерия устойчивости расстояния до края воронки. 2. Знаком * отмечены ведущие признаки, без которых оценка категорий устойчивости некондиционна

Характерной чертой данной методики является большое число учитываемых показателей, количество которых наращивается от одной стадии проектирования к другой. Часть показателей оценивается количественно, часть – качественно. Некоторые показатели являются основополагающими, недоучет которых прямым образом отражается на кондиционности конечной оценки. Отличительным моментом рассматриваемой методики является использование в процессе оценки показателей, получаемых по результатам геофизических исследований [93].

Определение категории устойчивости осуществляется в результате интегрирования балльным способом [109]. Для этого каждая из 6 категорий устойчивости кодируется соответствующим баллом. Сумма баллов по всем факторам, деленная на их количество, является основой для выделения интегральной категории устойчивости.

Широкое применение балльный способ оценки карстоопасности получил в зарубежной карстологической практике, особенно в течение последних двух десятилетий. В ряде случаев это связано с отсутствием в некоторых странах четкой нормативной базы, регламентирующей порядок проведения изысканий на закарстованных территориях. Зачастую действующие нормы регулирования изыскательской деятельности на закарстованных территориях многих стран и их субъектов составлены достаточно гибко, рекомендуя, таким образом, различные подходы к оценке карстоопасности. Такая ситуация наблюдается, например, во многих штатах США, действующие нормативные акты в пределах которых достаточно полно рассмотрел в своей работе S. Fleury [216].

Интегральная оценка карстоопасности побережья Алгарве (Португалия) на участке между Forte S. Joao и Marinha осуществлена балльным методом с учетом 13 основных факторов природного строения, оказывающих, по мнению авторов, наибольшее влияние на развитие карста в пределах исследуемой территории [217] (рисунок 1.6). В ходе оценки рассматриваются как качественные, так и количественные показатели. Интервалам значений количественных и категориям качественных показателей методом экспертной оценки присвоены баллы в зависимости от опасности проявления карста по принципу: чем больше балл, тем опаснее. Итоговая интегральная оценка карстоопасности осуществлена суммированием частных балльных оценок в пределах равномерной сети наблюдений с шагом 50 м.

Интегральная оценка карстоопасности балльным методом осуществлена С.N. Edmonds [210] в районах развития мелового карста Великобритании. В основу этой оценки положен широкий спектр факторов, всесторонне отражающих особенности природного строения исследуемых территорий. Всю совокупность рассматриваемых показателей автор подразделяет на группы с учетом двух критериев. Первый критерий выявляет генетическую принадлежность показателей. В этом отношении выделяются показатели геологической, гидрогеологической и геоморфологической групп. Вторым критерием подразделения факторов природного строения

вытекает из значимости показателей или их вклада в активизацию карстового процесса. В данном случае вся совокупность показателей-факторов подразделяется на группы высокого («major influential»), среднего («moderate influential») и слабого («minor influential») влияния (таблица 1.18). В зависимости от степени влияния фактора его категориям методом экспертной оценки присваиваются определенные баллы по следующему принципу: высокое влияние – от 0 до 20 баллов; среднее влияние – от 0 до 10, слабое влияние – от 0 до 5 баллов (рисунок 1.7). Чем выше балл, тем больше степень опасности карста.

Карстовые формы	Балл
Воронка, заполненная песком	10
Воронка незаполненная	20

Диаметр воронок, м	Балл
0 – 2	5
2 – 5	10
5 – 10	15
>10	20

Площадь входа в пещеру, м ²	Балл
<50	4
50 – 199	8
200 – 499	12
500 – 1000	16
>1000	20

Протяженность пещер, м	Балл
<20	4
20 – 40	8
41 – 60	12
61 – 80	16
>80	20

Овражность, %	Балл
0 – 25	4
26 – 50	8
51 – 75	12
76 – 100	15

Уклон поверхности рельефа, градус	Балл
<10	2
10 – 25	4
26 – 50	6
>50	10

Длина трещин бокового отрыва, м	Балл
0 – 5	1
6 – 10	2
11 – 15	3
16 – 20	4
>20	5

Ширина раскрытия трещин бокового отрыва, мм	Балл
<6	1
6 – 20	2
20 – 60	3
60 – 200	4
>200	5

Водопроницаемость разломов [259]	Балл
Высокая	8
Слабая	12
Средняя	20

Осыпи и оползания	Балл
В пределах зоны аэрации	5
В пределах зоны полного водонасыщения	10

Высота осыпи, м	Балл
<20	5
21 – 50	10

Предел прочности на одноосное сжатие карстующихся пород, МПа	Балл
Очень слабые (<1,25)	10
Слабые (1,25 – 5)	8
Относительно слабые (5 – 12,5)	6
Относительно прочные (12,5 – 50)	4
Прочные и очень прочные (>50)	2

Растительность	Балл
Деревья и кустарники высотой более 2 м	10
Кустарники высотой 1 – 2 м	6
Маленькие кустарники высотой менее 1 м	2
Травяной покров	10

Рисунок 1.6. Показатели к оценке картоопасности и их категории [217]

Таблица 1.18. Подразделение показателей-факторов на группы в зависимости от их генетической принадлежности и характера влияния на активность карстового процесса [210]

А. Генетическая принадлежность	Б. Активность карстового процесса
<p><i>Геологические показатели:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Отложения мела G_1 Характеристика отложений перекрывающей толщи G_c Горизонты, слагающие третичные отложения перекрывающей толщи Gr_1 Состав четвертичных отложений перекрывающей толщи Gr_2 Граничные участки и зоны выклинивания Gf <p><i>Гидрогеологические показатели:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Уровень подземных вод H_1 Топография, рельеф и особенности инфильтрации H_2 <p><i>Геоморфологические показатели:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Направление и границы поверхностного стока GM_1 Особенности залегания гляциальных отложений перекрывающей толщи GM_2 	<p><i>Высокое влияние:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Отложения мела G_1 Характеристика отложений перекрывающей толщи G_c Горизонты, слагающие третичные отложения перекрывающей толщи Gr_1 Состав четвертичных отложений перекрывающей толщи Gr_2 Граничные участки и зоны выклинивания Gf <p><i>Среднее влияние:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Уровень подземных вод H_1 Топография, рельеф и особенности инфильтрации H_2 Направление и границы поверхностного стока GM_1 <p><i>Слабое влияние:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Особенности залегания гляциальных отложений перекрывающей толщи GM_2

Расчет интегрального показателя картоопасности в условиях мелового карста Великобритании С.N. Edmonds [210] предлагает производить по следующей формуле:

$$SHR_N = (G_1 + G_c + Gr_1 + Gr_2 + Gf + H_1 + GM_1 + GM_2)H_2, \quad (1.50)$$

где SHR_N – показатель опасности оседания поверхности земли («subsidence hazard rating»).
Расшифровка условных обозначений, принятых в формуле, приведена в таблице 1.18 и на рисунке 1.7.

Отложения мела G_1		Балл
Верхний слой		20
Средний слой		2
Нижний слой		1

Характеристика отложений перекрывающей толщи G_c		Балл
Третичные отложения, перекрытые незначительным по мощности слоем четвертичных отложений или его отсутствием		14
Четвертичные отложения		6
Отсутствуют, но появляются в разрезе в пределах буфера 200 м		2
Отсутствуют		1

Горизонты, слагающие третичные отложения перекрывающей толщи G_T		Балл
Отложения горизонтов Reading и Woolwich		20
Отложениями горизонта Thanet (WND, END)		15
Обломочные породы (EA)		8
Мощная толща третичных отложений, включающая горизонт Thanet, перекрытый горизонтами Woolwich, Reading и Blackheath (WND)		4
Мощная толща третичных отложений, включающая горизонт Reading, перекрытый, а местами замещенный горизонтами London Clay и Bagshot (DPD)		2

Состав четвертичных отложений перекрывающей толщи G_2		Балл
Крупнообломочные отложения террас протодолин рр. Темза и Солент (CH, DPD)		20
Аллювиальные отложения, развитые в пределах площадей развития меловых отложений		13
Аллювиальные отложения в прочих условиях		1
Гляциальные отложения (CH, EA, L, Y)		12
Крупнообломочные отложения, приуроченные к низким террасам и долинам рек		6
Крупнообломочные отложения, приуроченные к высоким террасам и водораздельным плато		6
Глинистые отложения с включениями крупнообломочного материала		3
Твердые пылевато-глинистые отложения		1
Пластичные и текучие пылевато-глинистые отложения		1
Почвенно-растительный слой при отсутствии прочих отложений		0

Граничные участки и зоны выклинивания G_f		Балл
Выклинивание отложений горизонта Reading		3
Выклинивание отложений горизонта Thanet		4
Выклинивание обломочной толщи		2
Граница резкого выклинивания мощной толщи третичных отложений (WND, DPD)		1
Выклинивание четвертичных отложений, развитых в пределах площадей развития меловых отложений		2
Выклинивание четвертичных отложений в прочих условиях		0
Почвенно-растительный слой при отсутствии прочих отложений		0
Отсутствуют		0

Уровень подземных вод H_1		Балл
Перекрывающие отложения отсутствуют, уровень подземных вод ниже кровли мела		10
Перекрывающие отложения отсутствуют, уровень подземных вод совпадает с кровлей мела		1
Развиты перекрывающие отложения, уровень подземных вод ниже отметки кровли мела или перекрывающей толщи		10
Развиты перекрывающие отложения, уровень подземных вод поднимается выше отметки кровли мела или перекрывающей толщи в периоды паводка и половодий		5
Развиты перекрывающие отложения, уровень подземных вод совпадает с отметкой кровли мела или перекрывающей толщи		1
Развиты перекрывающие отложения, уровень подземных вод совпадает с отметкой кровли мела или перекрывающей толщи, фиксируются случаи его понижения в результате техногенного воздействия		3
Напорный режим подземных вод перекрывающей толщи		0

Направление и границы поверхностного стока GM_1		Балл
Коридор протодолины р. Солент (DPD)		10
Коридор протодолины р. Темза при условии отсутствия гляциального покрова и наличия прямой инфильтрации поверхностных вод в водоносный горизонт карстовых вод (CH)		10
За пределами коридоров указанных протодолин		0

Топография, рельеф и особенности инфильтрации H_2		Балл
<i>Категория 1 – сезонная или единовременная инфильтрация поверхностного стока в карстовый водоносный горизонт через толщу перекрывающих отложений</i>		
Водосборный склон		6
Естественные дрены (русовая часть, овраги, балки и пр.)		10
Водораздельное пространство		4
<i>Категория 2 – сезонная инфильтрация поверхностного и подземного (из карстового горизонта) стока в сторону перекрывающей толщи</i>		
Водосборный склон		1
Естественные дрены (русовая часть, овраги, балки и пр.)		2
Водораздельное пространство		1
<i>Категория 3 – сезонная или единовременная инфильтрация поверхностного стока в карстовый водоносный горизонт через незначительную по мощности толщу перекрывающих отложений (почвенно-растительный слой, текуче-грунты, пойменный аллювий)</i>		
Водосборный склон		1
Естественные дрены (русовая часть, овраги, балки и пр.)		3
Водораздельное пространство		1

Особенности залегания гляциальных отложений перекрывающей толщи GM_2		Балл
Гляциальные отложения перекрывают толщу мела (CH, EA, L, Y)		5
Гляциальные отложения подстилаются обломочными образованиями, перекрывающими толщу мела (EA)		3
Гляциальные отложения подстилаются отложениями горизонта Reading и/или крупнообломочными отложениями террас протодолины р. Темза, перекрывающими толщу мела (CH)		0
Гляциальные отложения отсутствуют		0
Развиты гляциальные отложения повышенной мощности		0

Примечание: аббревиатуры в скобках являются сокращениями названий регионов Великобритании, в пределах которых развит меловой карст: WND – West North Downs, END – East North Downs, EA – East Anglia, DPD – Dorset and Purbeck Downs, CH – Chiltern Hills, LY – Lincolnshire, Y – Yorkshire.

Рисунок 1.7. Показатели к интегральной оценке карстоопасности на территориях развития мелового карста Великобритании [210]

В зависимости от значений показателя SHR_N территории относятся к определенным категориям карстоопасности, приведенным в таблице 1.19.

Таблица 1.19. Категории карстоопасности в отношении формирования оседаний в пределах территорий развития мелового карста Великобритании [210]

Значение показателя SHR_N	Категория карстоопасности
<55	Неопасная
55 – 89	Очень низкая
90 – 136	Низкая
137 – 200	Средняя, ближе к низкой
201 – 300	Средняя
301 – 400	Средняя, ближе к высокой
401 – 600	Высокая
>600	Очень высокая

Сопоставление закартированных карстовых форм (оседаний, провалов и полостей) с результирующей интегральной моделью карстоопасности показали весьма хорошую сходимость выделенных категорий опасности и действительности. В связи с этим, предложенная модель оценки, рекомендована С.Н. Edmonds [210] в качестве базовой для определения карстовой опасности в условиях развития мелового карста на территории Великобритании.

Методику интегральной оценки карстоопасности балльным методом предложили W. Zhou, B.F. Beck и A.L. Adams [265] при карстологических исследованиях участка трассы I-70, расположенного неподалеку от г. Фредерик в штате Мэриленд, США. Примечательно, что предложенный подход к оценке карстоопасности именуется авторами *матричным анализом* («matrix analysis»). Среди факторов природного строения в анализе участвуют топографические особенности рельефа, формации, к которым приурочены коренные породы, генезис и мощность грунтов перекрывающей толщи отложений, удаленность от синклиналей складок, а также некоторые геофизические параметры (рисунок 1.8). Заметим, что в интегральную оценку авторами закладываются показатели, получаемые по результатам анализа взаимодействия [218], осуществляемого применительно к поверхностным карстовым формам. Итоговая модель карстоопасности получается прямым суммированием баллов, при этом, чем выше итоговый балл, тем наиболее вероятно проявление опасности в форме образования провала. На исследуемом участке трассы автодороги общий балл карстоопасности изменяется от 0 до 2,1.

Топография		Балл
Водораздел		0
Водосборный склон		0
Пойма и низины		1

Формация коренных карстующихся пород		Балл
Grove Formation		2
Lime Kiln		1
Adamstone		0

Генезис толщи перекрывающих отложений		Балл
Обвальное-карстовый		0
Аллювиальный		1

Мощность перекрывающих отложений, м		Балл
0 – 3		3
3 – 10		2
10 – 20		1
>20		0

Расстояние от центральной оси синклиналей, м		Балл
≤152		1
>152		0

Геофизические аномалии		Балл
Положительные резистивиметрические и микрогравитационные аномалии		2
Различные по знаку резистивиметрические и микрогравитационные аномалии		1
Отрицательные резистивиметрические и микрогравитационные аномалии		0

Расстояние от отрицательных форм рельефа (оврагов, промоин и т.д.), м		Балл
≤30		Устанавливается по количеству депрессий
>30		0

Расстояние от существующих карстовых воронок, м		Балл
≤30		Устанавливается по количеству воронок
>30		0

Рисунок 1.8. Показатели к интегральной оценке карстоопасности [265]

Испанские исследователи осуществили оценку карстоопасности в пределах трех исследуемых участков долины р. Эбро, близ г. Сарагоса (Испания) с применением экспертной (эвристической) оценки [221].

Проведенная авторами оценка осуществлена по поверхностным карстовым формам. Отдельные модели карстоопасности построены дифференцировано по типам поверхностных карстовых форм, среди которых авторами рассматривались суффозионные провалы, карстовые провалы, а также участки оседаний земной поверхности.

Основой оценки послужил метод картографического моделирования, которое сводится к построению комплекса растровых моделей, каждая ячейка которых представляет результат расчета соответствующего исследуемого показателя состояния природной среды или параметра карстоопасности.

Эвристическая оценка осуществлена авторами с учетом ряда ключевых, по их мнению, факторов развития карста в пределах исследуемых участков. Различным признакам и категориям исследуемых показателей природного строения экспертным способом присваивались баллы (рисунок 1.9). Растровые модели, отражающие изменчивость рассматриваемых показателей, классифицировались с учетом принятой балльной оценки. В результате их интегрального сложения была получена эвристическая модель карстоопасности.

Участок № 1 – суффозионные провалы		Ирригационная сеть		Техногенное использование		Мощность аллювия, м	
Геоморфологические элементы рельефа	Балл	10 м от сети	Балл	Водозаборы	Балл	0 – 10	Балл
Пойма	50	Более 10 м от сети	30	Ирригационные площади	12	10 – 20	8
Низкие террасы	40		0	Фруктовые сады	6		2
					4		

Участок № 2 – суффозионные и карстовые провалы		Геоморфологические элементы рельефа		Удельное электрическое сопротивление грунтовых вод		Годовые колебания уровня грунтовых вод, м	
Водосбор	Балл	Аккумулятивная долина	Балл	1700 – 2000	Балл	>2	Балл
3000 – 5000	50	>2000	20	>2000	10		6
>5000	6				25		

Участок № 2 – суффозионные и карстовые оседания		Удельное электрическое сопротивление грунтовых вод		Техногенное использование		Мощность аллювия, м	
Геоморфологические элементы рельефа	Балл	3000 – 5000	Балл	Ирригационные площади	Балл	0 – 20	Балл
Водосбор	50	>5000	32	25	25	20 – 30	12
Водораздел	40		6			30 – 40	4
							2

Участок № 3 – суффозионные провалы		Геоморфологические элементы рельефа		Удельное электрическое сопротивление грунтовых вод		Годовые колебания уровня грунтовых вод, м	
Аккумулятивная долина	Балл	0 – 10	Балл	1700 – 2000	Балл	0,5 – 1,5	Балл
20	20	10 – 20	10	>2000	10	1,5 – 2,0	5
		20 – 30	15		25	>2,0	10
			5				15

Участок № 3 – суффозионные и карстовые провалы		Техногенное использование		Мощность аллювия, м		Годовые колебания уровня грунтовых вод, м	
Расстояние до уступа низких террас, м	Балл	Ирригационные площади	Балл	0 – 10	Балл	0,5 – 1,5	Балл
>1700	40	25	25	10 – 20	20	1,5 – 2,0	10
				20 – 30	30	>2,0	20
					10		30

Участок № 3 – суффозионные и карстовые оседания		Техногенное использование		Мощность аллювия, м		Годовые колебания уровня грунтовых вод, м	
Расстояние до уступа низких террас, м	Балл	Ирригационные площади	Балл	0 – 10	Балл	0,5 – 1,5	Балл
>1700	40	25	25	10 – 20	20	1,5 – 2,0	10
				20 – 30	30	>2,0	20
					10		30

Рисунок 1.9. Категории исследуемых показателей природного строения и соответствующие им баллы при экспертной оценке карстоопасности [221]

Итоговые растровые модели карстоопасности приводились авторами к общей единице измерения с целью возможности их сопоставления друг с другом. Это достигается в результате разбиения всего численного интервала изменчивости растра на 200 одинаковых классов-интервалов по следующему критерию: чем выше класс, тем наиболее карстоопасным он является. Растровые модели карстоопасности, приведенные к общей шкале, авторы называют *моделями восприимчивости* («susceptibility models») среды к образованию карста.

При исследованиях в карстовых районах в зарубежной карстологической литературе наряду с термином «карстоопасность» («karst hazard») расхожим является понятие «уязвимость карстовых систем» («vulnerability of karst systems»), которое довольно часто отождествляется с

термином «уязвимость подземных вод» («ground water vulnerability»). Это связано с особенностью решаемых западными карстоведами инженерных задач, направленность которых часто имеет выраженный гидрогеологический характер, а инженерно-геологическая оценка имеет второстепенное значение. Например, подземные воды карстовых районов являются основным источником пресной воды для таких крупных западноевропейских городов как Гренобль, Вена, Рим, Париж, Инсбрук, карстовые водоносные горизонты широко эксплуатируются в Северной и Южной Африке, в некоторых штатах США (Миссури, Кентукки, Техас и др.). Согласно классификации В.В. Толмачева [10] оценочные построения, ориентированные на определение уязвимости подземных вод в карстовых районах, являются одной из сторон карстоопасности. Такие оценки он относит к типу А, которые связаны с загрязнением геологической среды.

Степень опасности подверженности карстовых вод загрязнениям принято выражать в понятиях «защищенности» или «уязвимости», имеющими одинаковый смысл, но обратное значение [166]. Наиболее часто используемым термином является «уязвимость». В.М. Шестопалов, А.Б. Климчук и др. [166] проработав и обобщив множественные материалы, под уязвимостью подземных вод или, в более обобщенном виде, уязвимостью карстового массива понимают «его чувствительность к загрязнениям, характеризуемую степенью развития комплексной барьерной функции верхней части геологической среды, определяемой развитостью физических и геохимических барьеров».

Уязвимость часто подразделяют на два вида: *общую (собственную) уязвимость* («intrinsic vulnerability») и *специальную (специфическую) уязвимость* («specific vulnerability»). Общая уязвимость определяется как внутреннее свойство карстового массива, выражаемое особенностями его природного строения, и не зависит от источника загрязнения. Специальная уязвимость, наоборот, оценивается в зависимости от характера загрязнителя. Она полностью основана на выявлении характера взаимодействия подземных вод с различными загрязнителями – неорганическими, органическими, механической взвесью. Количественная оценка специальной уязвимости осуществляется с применением детерминистических зависимостей, выстроенных применительно к отдельному конкретному загрязнителю [166, 202, 241].

Оценка карстоопасности типа А по своей сути совпадает с оценкой общей уязвимости (далее просто – уязвимости) подземных вод, которая осуществляется в процессе комплексного изучения природных условий развития карста. Например, согласно [251] общая уязвимость зависит от четырех главных характеристик: 1) наличие или отсутствие перекрывающих отложений; 2) фильтрационных свойств перекрывающих и карстующихся отложений; 3) интенсивности карстового процесса в приповерхностной части литосферы (провалообразование, развитая полостность, сеть пещер); 4) стадии развития карстового массива.

За последние 30 лет было предложено много подходов и методов оценки и картирования уязвимости подземных вод. Практически все они разработаны и предложены зарубежными исследователями и, по существу, немногим отличаются друг от друга. В нашей стране подобного рода исследования по оценке уязвимости ведутся относительно недавно. Так, обзоры, применяемых зарубежными специалистами методов, проведены в отечественной карстологической литературе только лишь в текущем столетии и имеют явную геоэкологическую ориентацию [79, 165]. Примечательным является тот факт, что практически все методы оценки уязвимости в карстовых районах являются индексно-рейтинговыми или балльными и носят интегральный характер [241]. Параметрические методы, ввиду сложности гидрогеологических условий строения карстовых массивов являются практически неприменимыми.

Среди зарубежных методов оценки защищенности карстовых массивов в отношении гидрогеологического загрязнения наиболее широко известными и используемыми являются методики DRASTIC [192], SINTACS и ЕРІК [208, 209], а также COP и COPK [201, 202]. Впервые оценка защищенности карстовых массивов по набору показателей их строения и особенностей внешних условий была предложена с разработкой методики DRASTIC. Расширением набора показателей и учитываемых параметров при оценке защищенности, а также сменой парадигмы осуществления самой оценки явилась разработка методики ЕРІК, которая в настоящее время также является устаревшей [204]. Наиболее прогрессивными и постоянно развивающимися направлениями оценки карстоопасности типа А являются методические подходы SINTACS и COPK.

Методика оценки и районирования территорий по степени карстоопасности в зависимости от характера уязвимости карстовых вод (ЕРІК) была разработана швейцарскими учеными и специалистами Невшательского университета [208, 209].

Под *уязвимостью* в методике ЕРІК понимается общее свойство всех карстовых водоносных горизонт, заключающееся в их повышенной чувствительности к изменению природных условий ввиду естественных или техногенных причин [222]. Уязвимость карстовых массивов не измеряется напрямую, а определяется косвенно путем анализа природных условий (главным образом геолого-гидрогеологических) территории исследования.

ЕРІК – это мультипараметрический метод, построенный на рассмотрении 4 комплексных показателей (таблица 1.20): 1) развитие карстовых форм («Epikarstic development», E); 2) характер и мощность перекрывающих отложений («Protective cover properties», P); 3) условия инфильтрации поверхностных вод («Infiltration conditions», I); 4) трещиноватость карстового массива («Karstic network», K).

Оценка уязвимости осуществляется путем интегрального суммирования всех параметров, приведенных в таблице 1.20, с учетом весовых коэффициентов, регулирующих степень влияние каждого из них. Итоговый показатель уязвимости называется *индексом защищенности F*:

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma K_k + \delta K_l, \quad (1.51)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – весовые коэффициенты.

Таблица 1.20. Подразделение параметров оценки уязвимости ЕРИК [224]

Геоморфологические особенности эпикарстовой зоны	E ₁	Пещеры, поноры, карстовые долины, карровые поля, «руиноподобный» рельеф, куэсты	
	E ₂	Переходные зоны, расположены вдоль простираания карстовых долин, каньонов, польев	
	E ₃	Остальные зоны	
		А. Хорошо проницаемые перекрывающие отложения, мощностью	Б. Слабопроницаемые перекрывающие отложения, с прослоями хорошо проницаемых, мощностью
Слабое влияние покровной толщи	P ₁	менее 0,2 м	-
	P ₂	0,2-1 м	0,2-1 м
	P ₃	более 1 м	более 1 м
Определяющая роль покровной толщи	P ₄	-	более 8 м слабопроницаемых отложений или более 6 м слабопроницаемых и более 1 м хорошо проницаемых отложений
Концентрированная инфильтрация	I ₁	Площадь воронки, понора. Дно и борта воронки и площадь поверхностного потока, уходящего в понор	
	I ₂	Площади направленного прямого стока с уклоном более 10% для вспаханных участков и более 25% для лугов и выгонов	
	I ₃	Площади направленного прямого стока с уклоном более 10% для вспаханных участков и менее 25% для лугов и выгонов. Прочие площади, где направленный поверхностный сток инфильтруется в толщу массива	
Рассеянная инфильтрация	I ₄	Остальные площади	
Сильнотрещиноватый массива	K ₁	Хорошо развитая сеть трещин. Мощные и протяженные полости, слабозаполненные и взаимосвязанные между собой	
Среднетрещиноватый массив	K ₂	Слабо развитая сеть трещин. Небольшие карстовые полости, слабо взаимосвязанные между собой, часто заполненные дисперсным материалом	
Слаботрещиноватый массив	K ₃	Пористые слабопроницаемые дисперсные отложения зоны разгрузки подземных вод, слабая локально развитая трещиноватость карстующихся пород	

Значения параметров ЕРИК и весовых коэффициентов измеряются в баллах. Шкала их значений, принятая в методике ЕРИК, приведена в таблицах 1.21 и 1.22.

Районирование территории с выделением категорий защищенности осуществляется по значениям конечного интегрального показателя F . Всего выделяется три категории защищенности, маркируемых S1, S2 и S3 (таблица 1.23). Принципы выделения этих категорий остаются не до конца проработанными и весьма субъективными. Типовое качественное

описание каждой из категорий, приведенное в [224], сводится к следующему: 1) категория S1 – поноры с характерными направленными в их сторону водными потоками, карстовые долины, карровые поля; 2) категория S2 – карстовые долины, карровые поля, суходолы, перекрытые дисперсными отложениями; 3) категория S3 – участки со значением индекса защищенности более 25 баллов; 4) без категории – участки со значением индекса защищенности более 25 баллов и значительной по мощности перекрывающей толщей дисперсных отложений.

Таблица 1.21. Баллы параметров ЕРІК [224]

E ₁	E ₂	E ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	K ₁	K ₂	K ₃
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Таблица 1.22. Баллы весовых коэффициентов [224]

Параметр	Е	Р	І	К
Весовой коэффициент	α	β	γ	δ
Балл	3	1	3	2

Таблица 1.23. Матрица значений индекса защищенности* [224]

K ₁ =1	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	9	15	18	12	18	21	15	21	24	18	24	27
P ₂ =2	10	16	19	13	19	22	16	22	25	19	25	28
P ₃ =3		17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P ₄ =4		18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30

K ₁ =2	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	11	17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P ₂ =2	12	18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30
P ₃ =3		19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P ₄ =4		20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32

K ₁ =3	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	13	19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P ₂ =2	14	20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32
P ₃ =3		21	24	18	24	27	21	27	30	24	30	33
P ₄ =4		22	25	19	25	28	22	28	31	25	31	34

* Цветовые обозначения: серый – условия, не встречаемые в природе; красный – категория защищенности S1; желтый – категория защищенности S2; зеленый – категория защищенности S3; без цвета – условия защищенности, характерные для всех территорий.

Переход от категорий защищенности к категориям уязвимости осуществляется согласно таблице 1.24. В ней же отражены интервалы баллов значений показателя защищенности, свойственные соответствующим категориям.

Таблица 1.24. Выделение категории уязвимости карстовых вод [224]

<i>Категории уязвимости</i>	<i>Показатель защищенности F</i>	<i>Категория защищенности S</i>
Очень сильная	9-19	S1
Сильная	20-25	S2
Средняя	более 25	S3
Низкая	более 25 (наличие в оценке параметров $P_4+I_{3,4}$)	Без категории

С применением методики ЕРІК была произведена оценка гидрогеологической уязвимости ряда карстовых массивов Швейцарии. Характерным примером может служить результат оценки уязвимости (карстоопасности) района St. Imier, расположенного в кантоне г. Берн.

Методика SINTACS разработана итальянскими специалистами и многократно апробирована при изучении ряда карстовых массивов Италии [204]. Ключевым моментом этой методики является дифференцированный подход к оценке защищенности в зависимости от эволюционной стадии развития карстового массива. Конкретная стадия устанавливается по структурно-тектоническим признакам: развитию систем трещин и разломов, определяющих закарстованность массива. Всего выделяется три стадии, соответствующие трем типам карстовых массивов:

1) *молодой карстовый массив* («young karst»). Для него характерна случайная и слабо развитая в пространстве система трещин. Карстовые формы находятся в зародышевом состоянии, долины небольшие и неглубокие. Развитие пещер и подземной полостности незначительное;

2) *развитый карстовый массив* («rather developed karst»). Характерна умеренно и закономерно развитая трещиноватость. Частые поверхностные формы на фоне широких и глубоких карстовых долин. Пещеры с развитыми галереями, иногда встречающиеся на поверхности земли карстовые источники с характерной широкой изменчивостью гидрохимического состава и гидродинамических параметров;

3) *голокарст или совершенный карстовый массив* («holokarst»). Характерна хорошо развитая система трещин с выделяющимися явными доминирующими направлениями. На поверхности земли очень широко представлены разнообразные карстовые формы различных масштабов. Пещеры с большим количеством ходов и огромными галереями, вертикальными шахтами. Широко встречаются карстовые источники и родники.

Результатом оценочных построений с использованием методики SINTACS является получение некоторого численного значения защищенности карстового массива – *индекса SINTACS*. Среди оцениваемых показателей строения карстового массива в методике SINTACS первостепенное значение отдается гидрогеологическим характеристикам, а геологическое строение на их фоне имеет подчиненное значение. Все рассматриваемые показатели имеют стандартную шкалу изменчивости значений, а также дополнительные три шкалы, зависящие от

типа карстового массива. Например, для глубин залегания подземных вод значения индекса SINTACS, в зависимости от типизации карстового массива определяются исходя из гиперболической зависимости, приведенной на рисунке 1.10.

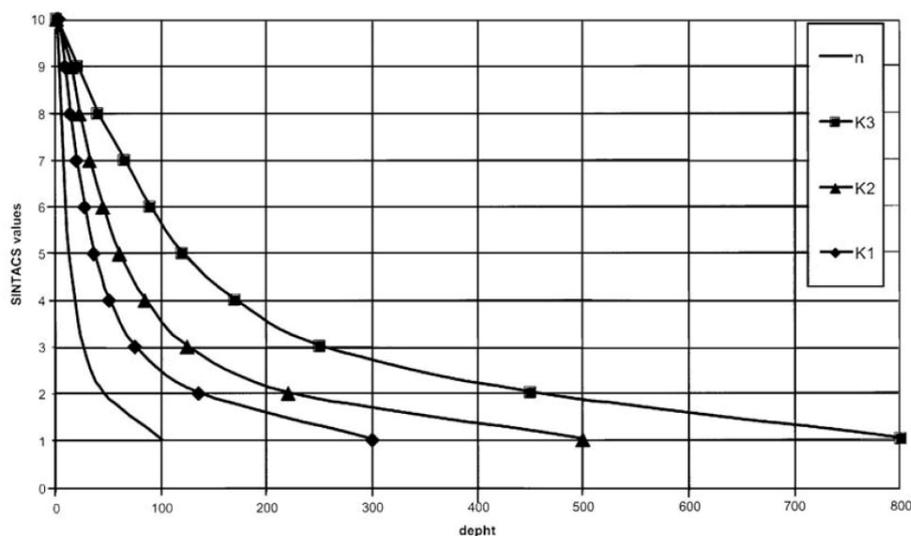


Рисунок 1.10. Определение индекса защищенности карстового массива по глубине залегания подземных вод: n – в общем случае; K1 – для молодого массива; K2 – для весьма развитого массива; K3 – для совершенного массива [204]

В постоянный набор для оценки защищенности всех карстовых водоносных горизонтов входят следующие показатели: глубина залегания подземных вод; коэффициент инфильтрации поверхностных вод, зависящий от характера и мощности покровных отложений; влагоемкостные свойства зоны активного водообмена толщи карстующихся отложений; влагоемкостные свойства зоны активного водообмена толщи покровных отложений; литологический состав и состояние карстующихся пород; коэффициент фильтрации; уклон поверхности земли. Интегральный учет индексов защищенности всех исследуемых показателей в разных точках массива осуществляется их суммированием. Он является основой для построения картографической модели общей защищенности исследуемого карстового массива.

Методика COP (COPK) оценки карстоопасности в результате определения степени уязвимости подземных вод разрабатывалась в рамках европейских стран на протяжении более чем десятилетия. С 1990 по 1995 гг. в Европе осуществлялись комплексные исследования в рамках единой Европейской координационной программы «Гидрологические подходы к оценке защищенности подземных вод в карстовых районах» («Hydrological aspect of groundwater protection in karstic terrains»). В дальнейшем эти исследования были продолжены в рамках новой международной программы «Картирование уязвимости и риска карбонатных (карстовых) водоносных горизонтов» («Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers»). Размах исследований включал 16 западноевропейских государств. В результате была разработана единая концепция оценки общей и специальной уязвимости подземных вод в

карстовых районах Западной Европы [201, 202]. Эта концепция в основе своей предполагает комплексное изучение строения карстового массива путем анализа различных составляющих его компонент [241]. Она зиждется на интегральном подходе к определению уязвимости с использованием балльных количественных оценок.

Картирование уязвимости в западноевропейских странах основано на применении так называемого «Европейского подхода» («European Approach» [202]). Он сводится к оценке четырех основных составляющих параметров, в оригинальной методике именуемых факторами: 1) поверхностный и подземный сток, определяемый степенью закарстованности территории (фактор С); 2) геологические условия, выраженные в характере перекрывающих и карстующихся отложений (фактор О); 3) атмосферные осадки (фактор Р); 4) трещиноватость карстового массива (фактор К). Часто оценки строятся с некоторыми допущениями. Например, в некоторых случаях фактор К исключается из рассмотрения.

Каждый из четырех перечисленных факторов (логичнее использовать термин «групп») состоит из набора показателей, характеризующих особенности строения карстового массива или характер внешних воздействий на него (рисунок 1.11). Значения показателей ранжируются по определенной шкале значений, после чего каждому рангу шкалы присваивается определенный балл, характеризующий степень уязвимости. Итоговая уязвимость по какому-либо из факторов определяется как сумма, а в некоторых случаях и как произведение уязвимостей по показателям, рассматриваемых в рамках этого фактора. Финальная общая уязвимость определяется как произведение всех факторных уязвимостей.

Характерной особенностью «Европейского подхода» является главенствующая роль фактора геологического строения (фактор О). Ему присваиваются целочисленные баллы уязвимости. Балльные оценки по остальным факторам изменяются в пределах доли единицы и играют роль своеобразного понижающего коэффициента, позволяющего получать взвешенные оценки при определении уязвимости подземных вод.

Оценка общей уязвимости карстового массива по методике COP широко используется в практических целях. По данным отчетных материалов международной западноевропейской программы COST 620 [202] карты уязвимости подземных вод построены для территорий некоторых карстовых районов таких стран как Испания, Германия, Франция и др. К настоящему времени разработано множество частных вариаций схем осуществления оценки методом COP (COPK). Все многообразие таких схем объединяет общая логика построения оценки и общность используемых показателей в рамках рассматриваемых факторов. Как указывают В.М. Шестопалов, А.Б. Климчук и др. [166], наряду с формированием общей методологии COP-оценки уязвимости подземных вод, продолжается тенденция к разработке модификаций, часто получающих региональные наименования, в которых варьируют состав учитываемых факторов,

оценочные критерии и шкалы. Примером может служить типовая схема, рекомендуемая для построения оценок уязвимости подземных вод на территории Западной Европы.

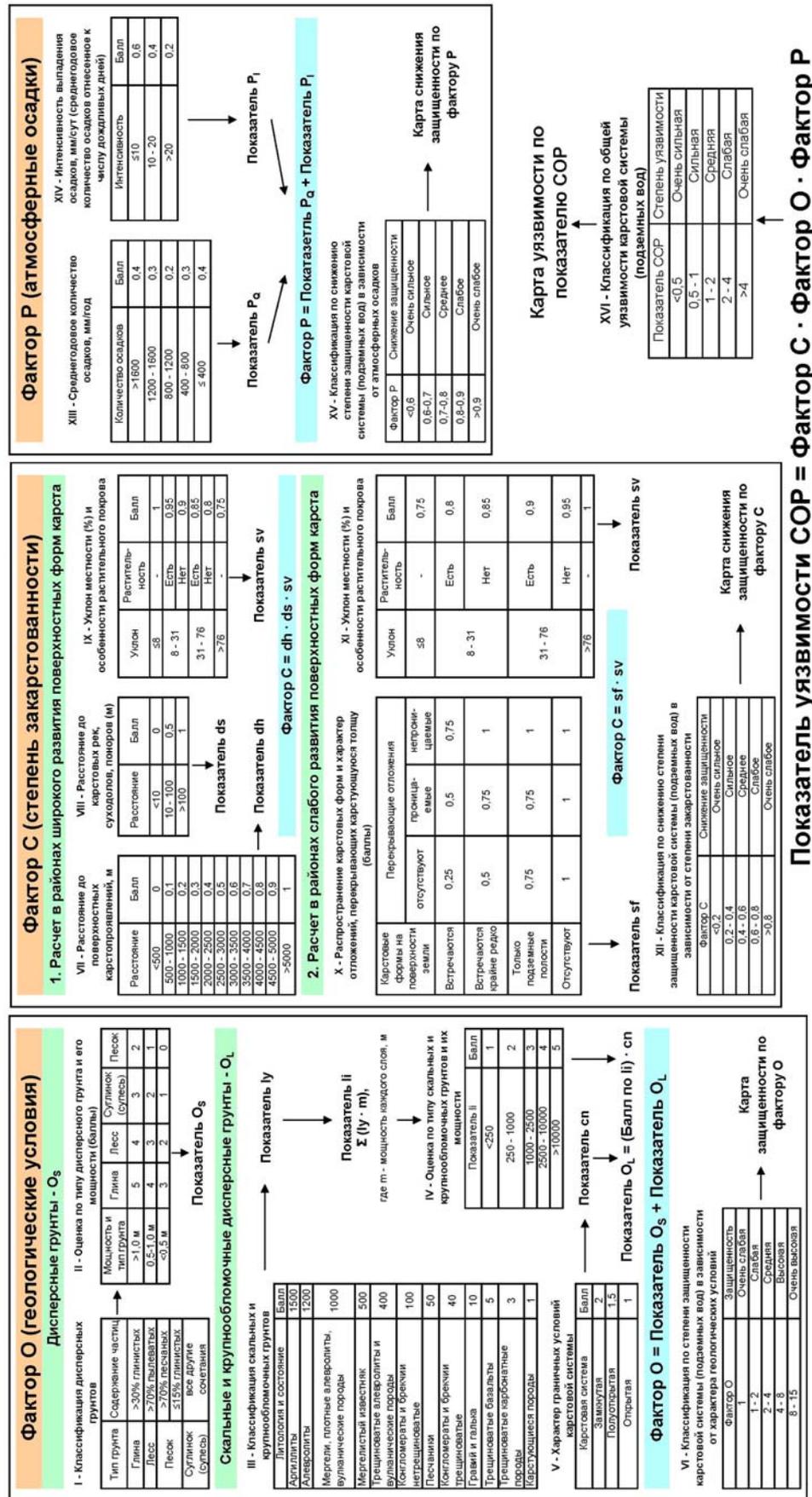


Рисунок 1.11. Схема оценки общей уязвимости подземных вод по методике COP [202]

1.3.3. Количественные оценки

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. Существенными преимуществами количественных интегральных оценок являются повышение объективности конечного результата и, в большинстве случаев, возможность более широкого оперирования факторами природного строения при составлении интегральной модели, добавления или исключения некоторых из них на любой стадии исследования.

Вероятностно-статистическую методика интегральной оценки карстоопасности с учетом всех факторов, влияющих на карстообразование, предложил В.В. Толмачев [146]. Его подход основывается на предположении о том, что распределение провалов во времени подчиняется закону Пуассона, согласно которому вероятность происхождения провалов за данный промежуток времени t равна:

$$P(t) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^t}{t!}, \quad (1.52)$$

где e – основание натурального логарифма, λ_0 – средняя интенсивность провалообразования в пределах исследуемого участка.

Характерной особенностью распределения Пуассона является то, что его математическое ожидание (среднее значение λ_0) равняется дисперсии σ^2 , что позволяет подходить к оценке средней интенсивности провалообразования λ_0 через оценку дисперсии. Известно, что одним из важных свойств последней является ее аддитивность, т.е. возможность ее выражения через набор частных факторных дисперсий. На этом свойстве дисперсии основан широко известный статистический метод с одноименным названием – дисперсионный анализ. Так, общая дисперсия интенсивности образования провалов может быть выражена как сумма частных дисперсий по отдельным факторам природного строения карстового массива:

$$\lambda_0 = \sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2 + \sigma_{ост}^2 \quad (1.53)$$

Последний член ряда факторных дисперсий называется остаточной дисперсией $\sigma_{ост}^2$ и объясняется в теории дисперсионного анализа двумя обстоятельствами. Во-первых, это наличие неучтенных факторов, а во-вторых – влияние изменчивости различных факторов. Таким

образом, оценка средней интенсивности провалообразования сводится к определению дисперсий по каждому из отдельных рассматриваемых факторов. Более подробно эта методика изложена в работах [146, 149].

Точность определения интенсивности провалообразования с применением предложенного В.В. Толмачевым расчета зависит от однородности природных условий в пределах исследуемого участка. В связи с этим автор рекомендует разделять исследуемую площадь на ряд участков, характеризующихся общностью природных условий, т.е. производить предварительное районирование закарстованной территории по качественным признакам.

Количественная оценка карстоопасности на основе *многомерного корреляционно-регрессионного анализа* предложена Н.А. Мироновым [111]. Она заключается в определении тесноты и характера связи показателей природных условий с показателями закарстованности с последующим построением прогнозных уравнений. Такие уравнения были построены Р.С. Зиангировым, Н.А. Мироновым и В.В. Пендиным [57] при оценке устойчивости и ее прогнозирования для территории Благовещенского участка Республики Башкортостан (водораздельное пространство, прилегающее к правому коренному склону р. Белой).

В качестве *прогнозируемых величин* Y (функций), характеризующих степень карстоопасности, ими применялись следующие показатели закарстованности [156]: Y_1 – удаленность центра участка территории от ближайшей карстовой воронки, м; Y_2 – плотность карстовых воронок, шт./км²; Y_3 – площадной показатель закарстованности, %; Y_4 – объемный показатель закарстованности, мм; Y_5 – плотность карстовых провалов, шт./км². В качестве аргументов участвовали следующие показатели природного строения: X_1 – абсолютная отметка земной поверхности, м; X_2 – абсолютная отметка кровли карстующихся пород, м; X_3 – мощность перекрывающих отложений, м; X_4 – мощность четвертичных отложений, м; X_5 – мощность неогеновых отложений, м; X_6 – мощность уфимских отложений, м; X_7 – уклон поверхности земли, градусы; X_8 – расчлененность территории, выраженная в виде показателя энтропийной характеристики; X_9 – расчлененность территории, выраженная в виде относительного показателя энтропии; X_{10} – глубина первого от поверхности водоносного горизонта, м; X_{11} – минерализация первого от поверхности водоносного горизонта, г/дм³; X_{12} – расстояние территории от тылового шва соответствующей террасы, м.

Вся исследуемая территория площадью 34 км² была разбита на 156 элементарных площадок площадью 0,25 км² каждая, в пределах которых изменчивость аргументов и функций была несущественной. По геоморфологическому признаку все площадки были подразделены на 4 участка. В пределах каждого участка и всей территории в целом с использованием ЭВМ была проведена статистическая обработка фактического материала, которая заключалась в

исследовании парных связей между коррелируемыми величинами для каждого участка и всей территории в целом.

Математическая модель взаимосвязи факторов природных условий с показателями закарстованности записывается в форме уравнений множественной регрессии, которые могут быть использованы в качестве прогнозных для детализации и оценки карстоопасности территории. Наиболее простая схема регрессионного анализа, получившая название «метода включения», основана на последовательном включении в регрессионную модель новых переменных с одновременной проверкой целесообразности их включения. В основу алгоритма положена многошаговая процедура с оценкой целесообразности включения в модель новых переменных и возвращением на каждом этапе к оценке эффективности ранее включенных переменных, для чего используется *критерий F*. Критическая величина критерия для включения и для исключения переменных остается одинаковой ($F = 4,0$).

В совокупности авторами было получено 20 прогнозных уравнений. Уравнения, характеризующиеся наибольшей прогностической способностью, получены авторами для поймы и первой надпойменной террасы:

- $Y_1 = 220,600 + 7,859X_3 - 40,393X_4 + 218,610X_{11} + 0,547X_{12}$ (при $R = 0,9597$)
- $Y_2 = -84,180 + 2,063X_2$ (при $R = 0,44$)
- $Y_3 = -15,284 + 0,184X_1 - 1,725X_8$ (при $R = 0,8258$)
- $Y_4 = -37,421 + 0,472X_2 + 1,004X_4$ (при $R = 0,7437$)
- $Y_5 = -45,154 + 1,0481X_2$ (при $R = 0,3$)

Из выше приведенных уравнений наиболее надежными для прогноза являются первое, третье и четвертое. Для них множественный коэффициент корреляции больше 0,7, что связано с достаточно заметной изменчивостью исследуемых факторов природного строения в пределах поймы и первой надпойменной террасы, а также с наличием достаточного числа поверхностных карстопроявлений. Уравнения, полученные при низких значениях множественного коэффициента корреляции (R менее 0,7) в качестве прогнозных могут быть использованы в исключительных случаях.

Испанские исследователи [219-221] отмечают, что применение корреляционных зависимостей и стандартных регрессионных уравнений в карстологических целях при оценке пространственного распространения карстовых форм не всегда оправдано, т.к. их результатом является прогнозирование конкретного значения исследуемой величины. Например, количества карстовых форм, их плотности распространения или интенсивности развития. Если же ставится вопрос о прогнозировании этих же величин, выраженных в вероятностной форме, с изменчивостью от 0 до 1, в пределах исследуемой территории в зависимости от действия тех или иных природных факторов, то стандартные регрессионные модели не дают положительного

результата. Это связано, прежде всего, с тем, что прогнозные значения вероятностей, полученных с их применением, будут изменяться в значительно более широких пределах, нежели от 0 до 1, что является ошибкой. В таких случаях применяются *логистические регрессионные модели (логит-преобразования)*, вероятность P , при использовании которых определяется выражением:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-y}}, \quad (1.54)$$

где e – основание натурального логарифма, y – зависимая переменная стандартного уравнения регрессии, имеющего вид:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i, \quad (1.55)$$

где a , b_i – коэффициенты регрессии, x_i – независимые переменные стандартного уравнения регрессии.

Под вероятностью P в логистической регрессии при карстологических исследованиях может пониматься встречаемость карстовых форм или плотность (интенсивность) их проявления в пределах изучаемой территории. Эта же вероятность выступает в качестве зависимой переменной y стандартного уравнения регрессии. Однако в данном случае она выражается в бинарной форме и принимает значения равные либо 1, либо 0, что отвечает, соответственно, присутствию карстовых форм, максимальной плотности или максимальной интенсивности их проявления и наоборот. В роли независимых переменных выступают исследуемые показатели природного строения. Определение коэффициентов регрессии осуществляется с применением стандартных статистических методов, широко освещенных в литературе по математической статистике и теории вероятности.

В ряде случаев оценку вероятности, получаемую по результатам логит-анализа, уточняют при помощи *функции благоприятного исхода F* («favourability function»):

$$F = \frac{\frac{P}{1-P}}{\frac{n_1}{n_0} + \frac{P}{1-P}}, \quad (1.56)$$

где P – вероятность, определенная по логистической модели; n_1 – частота встречаемости проявлений исследуемого процесса, шт.; n_0 – частота отсутствия проявлений исследуемого процесса, шт.

В роли частот n_1 и n_0 при карстологических исследованиях могут выступать карстовые формы, развитые в пределах границ изучаемых участков. Применение функции благоприятного исхода является оправданным, когда требуется нивелировать чрезмерно отклоняющиеся от реальных результаты вероятностного прогноза или уточнить их путем введения в регрессионную модель

новых сведениях о частоте развития карстовых форм в пределах исследуемого участка [191, 199, 252].

В карстологических целях при оценке карстоопасности территории метод логистического моделирования был применен испанскими учеными [221] при исследованиях долины р. Эбро на северо-востоке Испании (близ г. Сарагоса), занимающей общую площадь в 50 км². Логистические регрессии и функции благоприятного исхода рассчитывались в результате сопоставления карстовых форм и показателей природного строения. Всего в анализе участвовало 29 показателей разбитых на 6 групп в зависимости от их генетической принадлежности (таблица 1.25). 14 показателей, как отмечают авторы, имеют первостепенное значение в ходе оценки (отмечены курсивом в таблице 1.25).

Таблица 1.25. Факторы природных условий, используемые при интегральной оценке карстоопасности (курсивом отмечены основные факторы) [221]

<p>Топографические условия:</p> <p>1) <i>отметки рельефа поверхности;</i> 2) <i>уклон рельефа поверхности;</i> 3) <i>экспозиция рельефа поверхности.</i></p> <p>Геоморфологические условия:</p> <p>4) <i>геоморфологические элементы рельефа;</i> 5) <i>расстояние до старых русел;</i> 6) <i>расстояние до реки;</i> 7) <i>расстояние до границы контакта аллювиальных и коренных пород;</i> 8) <i>расстояние до уступа низких террас;</i> 9) <i>расстояние до наивысшей отметки развития аллювия.</i></p> <p>Геологическое строение:</p> <p>10) <i>литологический градиент (уклон залегания коренных карстующихся пород);</i> 11) <i>мощность аллювиальных отложений;</i> 12) <i>альтитуда контакта подошвы аллювиальных отложений и кровли коренных карстующихся пород.</i></p>	<p>Гидрогеологические условия:</p> <p>13) <i>уровень грунтовых вод;</i> 14) <i>градиент грунтовых вод;</i> 15) <i>мощность зоны аэрации;</i> 16) <i>мощность обводненной толщи аллювиальных отложений;</i> 17) <i>направление потока грунтовых вод;</i> 18) <i>скорость грунтового потока;</i> 19) <i>годовые колебания уровня грунтовых вод.</i></p> <p>Гидрогеохимия:</p> <p>20) <i>удельное электрическое сопротивление грунтовых вод;</i> 21) <i>содержание Na в грунтовых водах;</i> 22) <i>содержание Cl в грунтовых водах;</i> 23) <i>содержание SO₄ в грунтовых водах;</i> 24) <i>минерализация грунтовых вод;</i> 25) <i>насыщенность грунтовых вод кальцитом;</i> 26) <i>насыщенность грунтовых вод гипсом;</i> 27) <i>насыщенность грунтовых вод галитом.</i></p> <p>Техногенные условия:</p> <p>28) <i>ирригационная сеть (буфер 10 м от нее);</i> 29) <i>сброс техногенных вод.</i></p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Карстовые формы картировались по данным полевых рекогносцировочных исследований. Полевые карстологические исследования осуществлялись в течение двух лет – в 2005 и 2006 гг. В 2005 г. на исследуемой территории было закартировано 447 небольших провальных воронок, 23 крупные провальные воронки и 24 оседания поверхности земли, в 2006 г. – 500 новообразованных небольших провалов. Все закартированные карстовые формы были подразделены авторами на 3 типа:

1) небольшие провальные воронки (947 шт.) до 3-5 м в диаметре и 1,0-1,5 м глубиной закартированы, главным образом, в пределах низких террас;

2) крупные провальные воронки (23 шт.) до 50 м в диаметре и 6 м глубиной закартированы в пределах поймы, нередко заполнены водой;

3) оседания поверхности земли (24 шт.) в диаметре до 850 м по большей оси закартированы в пределах пойменной части р. Эбро.

Анализ проявления карста в зависимости от исследуемых факторов природного строения осуществлен испанскими учеными в результате построения картографических *моделей восприимчивости* («susceptibility models») в пределах всей исследуемой территории, как для каждого отдельного показателя, так и для различных совокупностей показателей. Эти модели отражают статистические взаимосвязи между показателями природного строения и карстовыми формами, выраженные в вероятностной форме в результате расчета функций благоприятного исхода. Оценка репрезентативности различных моделей восприимчивости осуществлялась авторами методом ROC-анализа в результате их сопоставления с карстовыми формами, не вошедшими в исследуемую выборку при их построении. Наиболее значимые модели восприимчивости строились по данным о провалах 2005 г., а их проверка осуществлялась с привлечением сведений о провалах, закартированных в 2006 г.

Согласно заключению авторов, лучшей предсказательной способностью характеризуется логистическая модель восприимчивости, построенная по карстовым формам 1 типа, закартированным в 2005 г. и учитывающая влияние следующих показателей природного строения (таблица 1.25): 4) геоморфологические элементы рельефа, 10) литологический градиент, 20) удельное электрическое сопротивление грунтовых вод, 26) насыщенность грунтовых вод гипсом, 28) ирригационная сеть и 29) сброс техногенных вод.

Лучшая модель восприимчивости впоследствии трансформирована авторами в *модель карстоопасности* («sinkhole hazard model») исследуемой территории. Для этого модель восприимчивости была подразделена на 200 классов, размер каждого из которых соответствовал размеру вероятности 0,05 д.е. (рисунок 1.12, А). Так класс 1 представляет интервал вероятности формирования карстовой формы от 0 до 0,05, в то время как класс 200 – интервал вероятности 0,95-1. В рамках каждого класса в результате сопоставления модели восприимчивости с карстовыми формами, закартированными в 2006 г., оценивались некоторые карстологические параметры: 1) частота встречаемости карстовых форм; 2) интенсивность провалообразования – отношение количества попавших карстовых форм к площади этого класса, помноженной на год; 3) вероятность поражения площади карстом – отношение суммарной площади провалов к площади класса, в пределах которого они локализованы, помноженной на год.

Зависимость частоты встречаемости карстовых форм от классов восприимчивости выражена авторами теоретической экспоненциальной кривой (рисунок 1.12, Б), точность прогнозирования, с применением которой оценена как хорошая. С использованием

установленной взаимосвязи авторами построена *прогнозная картографическая модель карстоопасности* («optimistic karst hazard model», рисунок 1.13), отражающая интенсивность образования провалов в пределах низких террас р. Эбро (1 тип).

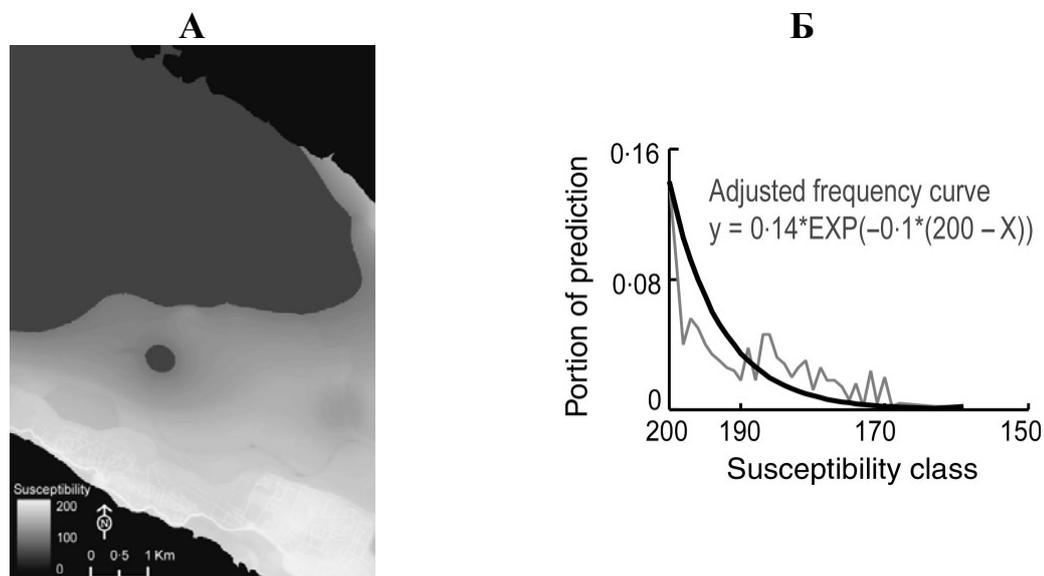


Рисунок 1.12. Картографическая модель восприимчивости, построенная по провалам 1 типа (А) и зависимость частоты встречаемости карстовых форм от класса восприимчивости (Б) [221]

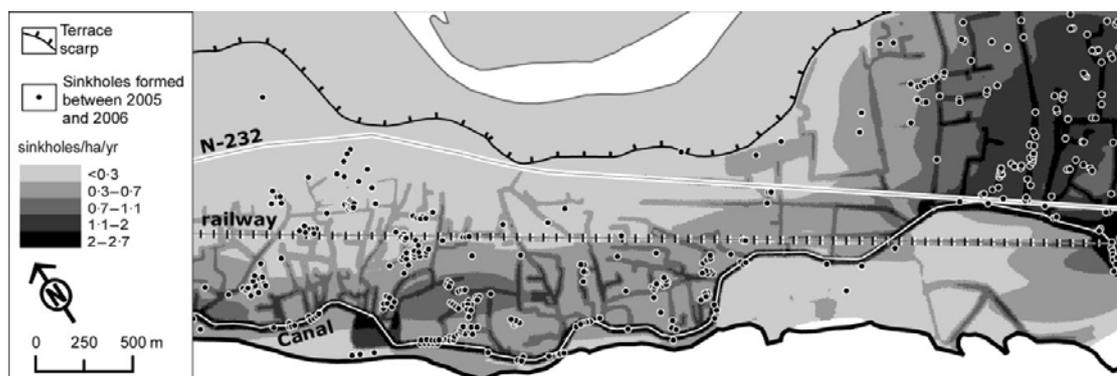


Рисунок 1.13. Карта карстоопасности долины р. Эбро относительно формирования провалов 1 типа [221]

Авторы справедливо указывают на ряд ограничений построенной модели карстоопасности: 1) данная модель отражает активность карста только в пределах низких террас, т.е. является ограниченной в площадном отношении; 2) трансформация модели восприимчивости в модель карстоопасности произведена с учетом карстовых форм, сформированных в годовой промежуток времени, что является недостаточным сроком для построения устойчивых оценок; 3) используемая модель восприимчивости может отражать неверную информацию о вероятности карстообразования в зависимости от изменчивости природных условий, например, в результате резкой смены гидрогеологической обстановки.

Китайскими специалистами [240] предложена модель интегральной оценки карстоопасности, позволяющая оценивать *вероятность образования провала* H_{coll} с учетом трех комплексных показателей:

$$H_{coll} = \frac{5F_w + 3F_s + 2F_r}{100}, \quad (1.57)$$

где F_w – уровни грунтовых вод в периоды межени и паводков; F_s – мощность толщи перекрывающих отложений; F_r – степень закарстованности коренных пород и расстояние от тектонических разломов.

При расчете вероятности образования провала H_{coll} оцениваемые показатели природных условий F учитываются в нормализованной форме с интервалами их изменчивости от 1 до 10, отвечающими, соответственно, наименьшему и наибольшему вкладу в формирование провала. Нормализация осуществляется экспертным методом в результате изучения распределения карстовых форм по значениям исследуемых показателей. Данная методика была применена при комплексной оценке карстоопасности и рисков г. Люпаньшуй провинции Гуйчжоу в Китае [240].

Вероятностная оценка провальной опасности в условиях техногенной подземной подработки территории предложена немецкими исследователями [242] на примере долины р. Рур с учетом геологических и техногенных признаков в результате их сопоставления с 78 провалами, закартированными в пределах рассматриваемой территории, и особенностями их пространственного развития. Входные исследуемые показатели геологического строения и техногенных условий могут иметь как качественную, так и количественную форму выражения. Всего авторы рассмотрено 7 показателей: 1) приуроченность к геоструктурам; 2) однородность толщи пород; 3) основные породы, слагающие приповерхностную часть разреза; 4) техногенная подработка подземного пространства; 5) техногенная освоение (застройка) территории; 6) характер локализации провалов в пространстве; 7) радиус локализации ближайшего соседнего провала.

Ключевой особенностью оценочной методики является анализ показателей природно-техногенных условий в рамках иерархической структуры, в которой исследуемые показатели разбиты на уровни в зависимости от масштабности их проявления. Так, при исследовании показателей геологического строения выделено 4 уровня, а при оценке техногенных условий – 3. В рамках структурной модели, составленной по геологическим показателям, выделяется 16 ветвей, в рамках структурной модели особенностей техногенных условий – 8. Каждой ветви в рамках рассматриваемых моделей присвоен свой индекс и номер: V – для геологических условий, D – для природно-техногенных. Картографическим способом осуществлен подсчет провалов, локализованных в пределах территорий с определенным индексом, и рассчитана

частоту (вероятность) p их встречаемости. Иерархические модели распределения провалов по оцениваемым показателям природно-техногенных условий приведены на рисунках 1.14 и 1.15.

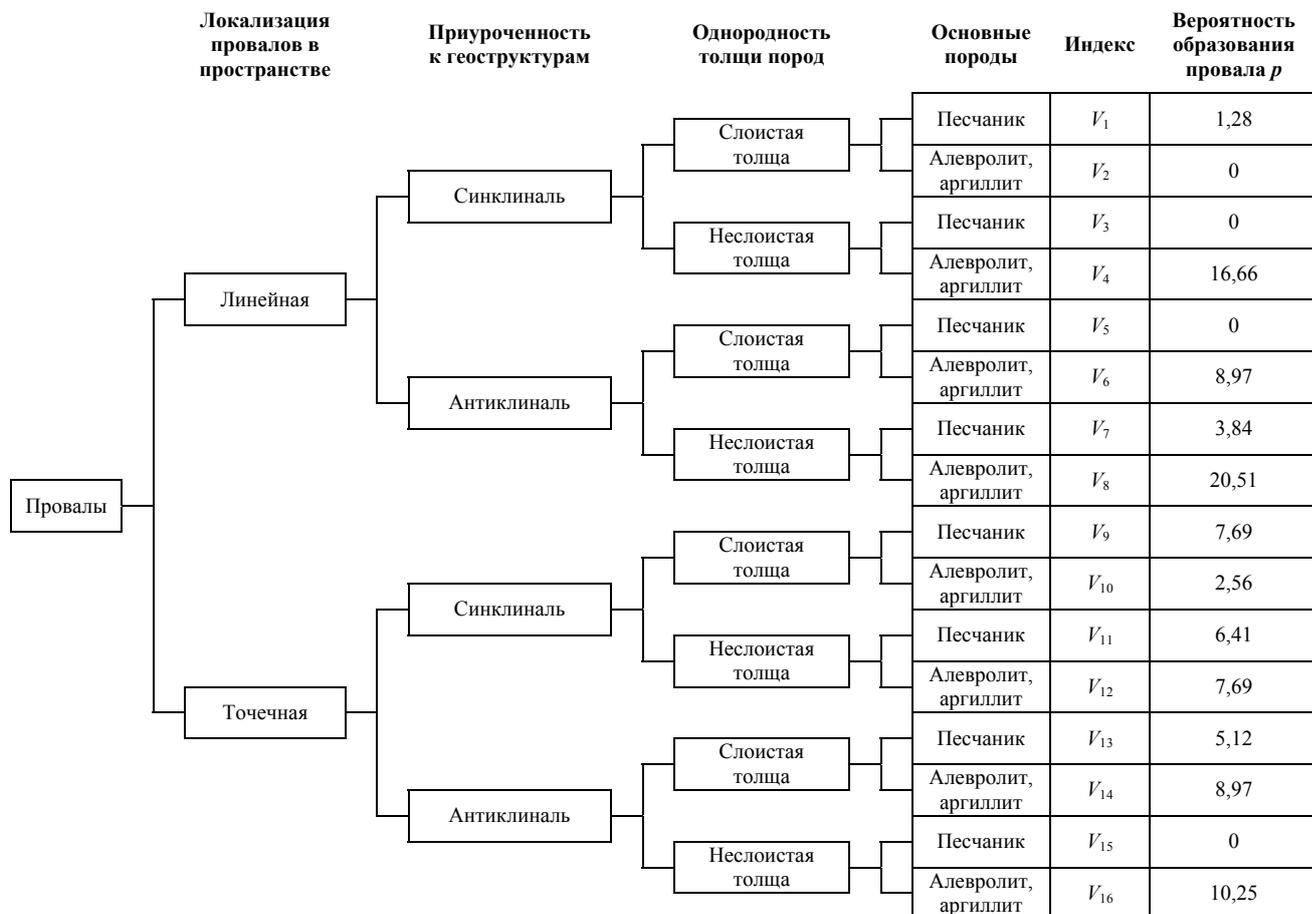


Рисунок 1.14. Распределение провалов по показателям геологического строения [242]



Рисунок 1.15. Распределение провалов по показателям техногенной нагрузки [242]

Количественная оценка опасности проявления провалов с применением предложенного алгоритма осуществляется вероятностным способом в результате прямого сопоставления

индексов геологического строения V и техногенных условий D . Так, согласно I. Lerche и С. Lempp [242], вероятность образования провала в определенных условиях геологического строения V_i под влиянием какой-либо внешней техногенной нагрузки D_j или комплекса внешних техногенных факторов может быть определена с применением *байесовского принципа* («Bayes Principle») или в результате расчета *средне вероятного исхода*. Авторами была составлена матрица для оценки вероятности образования провала в зависимости от совместного действия рассматриваемых в анализе геологических и техногенных условий (таблица 1.26). Нулевые значения вероятности, приведенные в таблице 1.26, свидетельствуют о слабой взаимосвязи анализируемой пары показателей между собой и, как следствие, невозможности получения истинных прогнозных оценок в условиях имеющихся данных.

Отметим, что данный подход к оценке провальной опасности в условиях подземной техногенной подработки территории может быть адаптирован применительно к задачам оценки карстоопасности.

Таблица 1.26. Совместные распределения провалов по показателям геологического строения и техногенной нагрузки $p(V_i/D_j)$ [242]

		V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}
		1,28	0	0	16,66	0	8,98	3,85	20,48	7,68	2,56	6,40	7,68	5,12	8,97	0	10,25
D_1	12,82	0	0	0	2,56	0	0	0	1,28	1,28	1,28	2,56	2,56	0	0	0	1,28
D_2	2,56	0	0	0	0	0	0	0	0	1,28	0	0	1,28	0	0	0	0
D_3	51,28	0	0	0	5,13	0	5,13	3,85	19,20	0	1,28	2,56	0	2,56	5,13	0	6,41
D_4	10,25	0	0	0	0	0	0	0	0	2,56	0	1,28	0	2,56	1,28	0	2,56
D_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D_7	20,51	1,28	0	0	8,97	0	3,85	0	0	1,28	0	0	2,56	0	2,56	0	0
D_8	2,56	0	0	0	0	0	0	0	0	1,28	0	0	1,28	0	0	0	0

Комплексная количественная методика оценки карстоопасности безотносительно ко времени была предложена Н.А. Блоцким и В.Г. Тихомировым [29], а в дальнейшем ими же усовершенствована в отношении временного фактора [5]. Данная методика имеет интегральный характер и рассматривает влияние множества факторов (тектонических, литологических, гидрогеологических и др.) на процесс карстообразования. В качестве математического аппарата при обработке количественной информации по всем факторам, влияющим на карстообразование, служит *формула вероятностных гипотез Бейеса*. Эта формула обеспечивает получение оптимального классификатора в тех случаях, когда изучена информативность признаков на известных участках и вероятность появления события (карстового провала) для каждого класса.

При карстологическом прогнозировании, когда имеется два класса N_1 и N_2 , соответственно, для участков с провалами на поверхности и с отсутствием провалов можно записать следующие соотношения:

$$\frac{P(N_1/x)}{P(N_2/x)} > 1, \quad \frac{P(N_1/x)}{P(N_2/x)} < 1, \quad (1.58)$$

где $P(N_1/x)$ и $P(N_2/x)$ – условные вероятности появления признаков x , соответственно, в классах N_1 и N_2 . В случае первого неравенства говорят о показе класса N_2 , в случае второго – о показе класса N_1 .

В случае, когда количество показов классов N_1 и N_2 одинаково, а признак может принимать только значения 1 и 0, т.е. либо признак присутствует, либо его нет, формула Бейеса принимает вид:

$$y = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \quad \begin{cases} > 0 \text{ показан образ } N_1 \\ < 0 \text{ показан образ } N_2 \end{cases}, \quad (1.59)$$

где α и β – соответственно, информативности i -х положительных и отрицательных признаков.

Сумма положительных и отрицательных мер информативности называется *полной информативностью признака* γ и определяется по формуле:

$$\gamma_i = |\alpha_i| + |\beta_i|, \quad (1.60)$$

Формулы Бейеса применимы как при оценке информативности, так и в целом при прогнозировании принадлежности объекта к типу территории опасной или безопасной в провальном отношении.

Принцип введения фактора времени в прогнозную оценку обеспечивается путем сравнения опорных объектов по плотности поверхностных карстопоявлений за определенный срок наблюдения (в авторских расчетах он составил 9 лет) и внесения этих данных в расчетную формулу Бейесовского классификатора. Для начала выбирается два класса образов в пределах одного и того же района: площади, где за расчетный срок появились карстовые провалы и, соответственно, площади, где за тот же период их не появилось. Далее расчет ведется по вышеуказанной схеме теории вероятностей.

Весь комплекс используемых при оценке показателей Н.А. Блоцкий и Н.Н. Ковшиков сводят к 6 группам: почвенно-растительным, гидрогеологическим, литолого-фациальным, тектоническим, геофизическим и геоморфологическим. В первую очередь исследуются показатели, ускоряющие карстообразование в зависимости от типа карста и местных условий. Для проведения прогнозных построений с применением теоремы апостериорных вероятностей вся информация по отдельным показателям карстоопасности представляется в виде картографических площадных построений одного масштаба (1:25000). Расчет параметров Бейеса ведется с применением квадратной сетки размером 500×500 м, накладываемой на карты, построенные по показателям карстоопасности.

Набор включаемых в анализ показателей составляется на основе принципа максимального извлечения информации с учетом их расчетной значимости в активности карстового процесса на

исследуемой территории. Для этого анализ проводится по двум заранее выбранным ключевым участкам: на одном из них в течение расчетного срока неоднократно появлялись карстовые провалы, а на другом провалов не наблюдалось. Расчетная значимость показателей определяется по параметрам Бейеса. Например, в ходе анализа, проведенного в работе [5] на территории карьера Яворовского горно-химического предприятия «Сера», было выделено 130 показателей карстоопасности, из которых информативными оказались только 37 (таблица 1.27).

На следующем этапе производится разделение всего набора используемых показателей карстоопасности в пределах двух исследуемых участков по квадратам сетки на две типовые группы – N_1 и N_2 . Основанием для отнесения показателей к той или иной группе является следующее условие: показатели 7 и более раз в определенном сочетании должны появляться на участках одной группы и полностью отсутствовать в таком сочетании в квадратах другой группы. Такое условие повышает достоверность прогноза на информативных участках, но, в то же время, несколько расширяет зону неопределенности на участках с недостаточной информацией. В результате расчета в набор для прогноза входят показатели максимальной встречаемости для группы N_1 и N_2 .

На заключительном этапе рассчитывается прогнозная карстоопасность, для чего из всех квадратов исследуемой территории с использованием ранее построенного картографического материала извлекаются значения присутствия или отсутствия информативных показателей. Далее осуществляется сопоставление имеющихся показателей в квадрате с ранее составленным типовым набором, характерным для групп N_1 и N_2 , и определяется вероятность $Q(N_1)$ отнесения квадрата к группе N_1 по формуле:

$$Q(N_1) = \left(\frac{\sum N_1}{MN_1} - \frac{\sum N_2}{MN_2} \right) \cdot 50 + 50\%, \quad (1.61)$$

где $\sum N_1$ и $\sum N_2$ – суммарная информативность показателей, соответственно, групп N_1 и N_2 , характеризующих принадлежность площадки квадрата к одноименной группе; MN_1 и MN_2 – максимальная информативность показателей, соответственно, групп N_1 и N_2 (в пределах исследуемой авторами территории она равна, соответственно, 10883 и 8905).

Вероятность $Q(N_2)$ отнесения площадки квадрата к группе N_2 равна обратной величине:

$$Q(N_2) = 100 - Q(N_1), \quad (1.62)$$

На основании расчетных значений вероятности отнесения элементарной площадки-квадрата к группе N_1 (появление провалов) или N_2 (отсутствие провалов) Н.А. Блоцким и Н.Н. Ковшиковым [5] построена прогнозная карта провальной опасности территории карьера за период 9 лет. На данной карте выделены три зоны: *опасная* (значения вероятности выше 0,55), *промежуточная* (0,45-0,55) и *безопасная* (менее 0,45).

Таблица 1.27. Набор признаков для прогноза карстоопасности [5]

Группа признаков	Поисковые признаки	Номер признаков	Место поискового признака по информативности	N_1	N_1	N_2	N_2	α_i	β_i	γ_i
				$m_x = 1$	$m_x = 0$	$m_x = 1$	$m_x = 0$	$x = 1$	$x = 0$	
1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
А	Приуроченность к пойме реки	1	24	3	33	7	29	-0,84	1,26	2,10
	Наличие жилых, промышленных зданий с трещинами	2	17	14	22	2	34	1,95	-0,44	2,39
	Наличие травяного покрова, посевов	3	23	33	3	18	7	1,26	-0,48	2,10
Б	$K_m = 1500-2500 \text{ м}^2/\text{сут.}$	4	6	0	36	12	24	-2,48	0,4	2,88
	Расположение участка в зоне инфильтрации поверхностных вод	5	5	36	0	24	12	2,48	-0,4	2,88
	Общая минерализация подземных вод 3 горизонта свыше 3 г/л	6	10	36	0	26	10	0,32	-2,3	2,62
В	Общая минерализация 0,2-0,3 г/л	7	18	0	36	8	28	-2,08	0,25	2,33
	Мощность гипосангидритовой толщи до 10 м	8	19	0	36	8	28	-2,08	0,25	2,33
	Мощность гипосангидритовой толщи свыше 20 м	9	11	30	6	10	26	1,1	-1,47	2,57
	Мощность ратинских известняков свыше 2 м	10	29	1	35	5	31	-1,61	0,12	1,73
	Гипс кристаллический	11	2	0	36	15	21	-1,71	0,54	3,25
	Гипосангидрит трещиноватый, кавернозный	12	26	11	25	2	34	1,7	-0,31	2,01
	Провал бурового инструмента в кровле гипосангидритовой толщи	13	35	6	30	1	35	1,19	-0,15	1,34
	Провал бурового инструмента в подошве гипосангидритовой толщи	14	3	15	21	0	36	2,71	-0,53	3,24
	Суммарный провал более 1 м	15	30	5	31	1	35	1,61	-0,1	1,71
	Одинокая карстовая полость с заполнителем	16	47	1	17	2	16	20,69	0,06	0,75
	Несколько открытых полостей	17	14	9	27	0	36	2,19	-0,28	2,47
	Несколько полостей с заполнителем и без него	18	1	34	2	12	24	1,05	-2,49	3,54
	Мощность четвертичных отложений до 5 м	19	41	15	21	7	29	0,77	-0,32	1,09
	Мощность четвертичных отложений более 10 м	20	52	10	26	11	25	-0,1	0,04	0,14
	Мощность верхнеторгонских нижнесарматских глин до 10 м	21	25	17	19	6	30	1,64	-0,45	2,09
	Мощность верхнеторгонских нижнесарматских глин более 20 м	22	4	0	36	15	21	-2,7	0,54	3,24
	Четвертичные отложения, представленные песками и супесями	23	15	35	1	27	9	0,26	-2,2	2,46
	Четвертичные отложения, представленные суглинками	24	13	0	36	9	27	-2,2	0,28	2,48
	Мощность косовских песчаников 5 м	25	37	28	8	14	22	0,29	-1,06	1,3
	Выход керна карстующихся пород менее 90%	36	5	16	2	5	13	1,16	-1,87	3,03
Объемный коэффициент закарстованности по керна более 10%	37	21	16	2	8	10	0,69	-1,61	2,3	
Г	Перегиб (крыло) структуры по нижнему тортону	26	20	0	36	8	28	-2,08	0,25	2,33
	Поднятие (свод) по нижнему тортону	27	12	9	27	0	36	2,2	-0,28	2,48
	Ядро синклинали по нижнему тортону	28	8	0	36	10	26	-2,3	0,43	2,73
	Неотектоническое нарушение	29	34	19	17	8	28	0,86	-0,5	1,36
	Пересечение зон нарушений	30	28	5	31	0	36	1,61	-0,15	1,76
	Амплитуда нарушений свыше 5 м	31	9	10	26	0	36	2,3	-0,32	2,62
Д	Значение изоом на карте более 30 м	32	16	23	4	9	18	1,5	-0,93	2,43
	Углы наклона асимптотической ветки 30° и менее	33	39	32	4	25	11	0,75	-1,01	1,26
Е	Значение коэффициента закарстованности по ВЭЗ, ЗСБЗ 0,5-0,75	34	27	18	9	6	21	1,1	-0,84	1,94
	Относительное превышение рельефа земной поверхности более 5 м	35	40	3	24	1	26	1,1	-0,08	1,18

* Буквенные обозначения в столбце 1: А – почвенно-растительные; Б – гидрогеологические; В – литолого-фациальные; Г – тектонические; Д – геофизические; Е - геоморфологические

Интегральная методика оценки карстоопасности предложена С.В. Щербаковым и В.Н. Катаевым [176, 177, 184] в ходе исследований на территории г. Кунгур (Россия, Пермский край). Согласно авторам она ориентирована в первую очередь на прогнозные построения и направлена на предварительное получение информации о карстовой опасности в пределах мало изученных в карстовом отношении участков. Данная методика основана на выявлении

эмпирических распределений *количества карстовых форм n* (провалов, древних провальных воронок, подземных полостей, раздробленных зон) по значениям исследуемых *факторов природного строения x* и последующем подборе наиболее точно описывающих их теоретических законов распределения. Среди теоретических зависимостей, которыми авторы описывали наблюдаемые распределения, использовались нормальный и логнормальный законы, экспоненциальное распределение, а также предложенное авторами нормализованное распределение. Степень «схожести» эмпирических и теоретических распределений устанавливается как графическим методом в результате исследования гистограмм, так и аналитическими способами с использованием ряда критериев (критерий нормального закона, критерий хи-квадрат, критерий Колмогорова).

Анализ теоретических распределений карстовых форм по показателям природного строения и выделение наиболее карстоопасных участков их значений ведется, опираясь на правило «трех сигм (стандартных отклонений)», являющегося характерной особенностью 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. 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 выше сказанным при оценке карстовой опасности С.В. Щербаковым и В.Н. Катаевым предлагается выделять 3 категории, ограниченные с учетом следующих критериев:

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

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:

$$P_r = P \cdot |r| \quad (1.63)$$

Таким образом, вероятность отнесения исследуемого показателя в разрезе скважины к той или иной степени карстовой опасности занижается в тех случаях когда, связь между количеством карстопоявлений 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:

$$P_{sum} = \prod_{i=1}^k (P_r)_i, \quad (1.64)$$

где k – количество частных вероятностных показателей карстовой опасности.

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

$$\lambda = k + \lg P_{sum} \quad (1.65)$$

Показатель карстовой опасности безразмерен и его значения варьируют около нуля. Проведенные расчеты при различных количествах частных вероятностных показателей позволили сделать вывод о том, что все значения λ меньше нулевого, характерны для неопасных в отношении развития карста участков территорий. В связи с этим рекомендуется искусственно округлять все отрицательные значения до нуля. Участки, относящиеся к потенциально опасным приурочены к значениям показателя λ немногим превышающим 0, как правило, это значения не превышающие 1-2. Все остальные значения показателя карстовой опасности характерны для опасных участков исследуемой площади. При количестве исследуемых показателей не превышающем 20, ранжирование территории по степени карстовой опасности рекомендуется проводить с учетом следующих соотношений [38, 184]:

1) практически неопасные территории $\lambda_i < \frac{\lambda_{max}}{10}$;

2) потенциально опасные территории $\frac{\lambda_{max}}{10} \leq \lambda_i < \frac{\lambda_{max}}{3}$;

3) опасные территории $\lambda_i \geq \frac{\lambda_{\max}}{3}$.

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.

На территории г. Кунгур исследуемые показатели складываются из комплекса геологических, гидрогеологических, геоморфологических, структурно-тектонических и инженерно-геологических параметров природного строения [182, 184]. Каждая отдельная группа включает набор частных показателей (таблица 1.28). Отдельный набор частных показателей по ряду признаков может быть использован для решения задач по оценке карстоопасности. Например, первые шесть показателей гидрогеологического строения взаимно дополняют себя и детализируют характер карстовой опасности в зависимости от конфигурации гидродинамических зон.

Таблица 1.28. Показатели, используемые при оценке карстоопасности на территории г. Кунгур [184]

Показатели геоморфологического строения:

- Абсолютные отметки рельефа поверхности земли, м;
- Надпойменные террасы и их уступы, ;
- Уклон земной поверхности, градусы;
- Экспозиция склона, градусы.

Показатели геологического строения:

- Строение по геологическому разрезу, тип;
- Мощность четвертичных дисперсных отложений, м;
- Мощность неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений, м;
- Общая мощность четвертичных и неоген-четвертичных отложений, м;
- Глубина залегания кровли иренских сульфатно-карбонатных отложений, м;
- Глубина залегания кровли неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений, м;
- Подземный рельеф кровли неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений, абс. м;
- Подземный рельеф кровли иренских сульфатно-карбонатных отложений, абс. м.

Показатели структурно-тектонического строения:

- Линейная плотность линеаментов, км/км²;
- Плотность пересечений линеаментов, шт./км²;
- Показатель тектонической блочности, км².

Показатели гидрогеологического строения:

- Глубина залегания вод четвертичного аллювиально-делювиального комплекса, м;
- Глубина залегания подземных вод неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений, м;
- Глубина залегания подземных вод иренских карбонатно-сульфатных отложений, м;
- Уровень подземных вод четвертичного аллювиально-делювиального комплекса, абс. м;
- Уровень подземных вод неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений, м;
- Уровень подземных вод иренских карбонатно-сульфатных отложений, м;
- Средняя минерализация вод иренского водоносного горизонта, г/дм³;
- Фациальный состав подземных вод иренских карбонатно-сульфатных отложений (по Г.А. Максимовичу), первые три преобладающие по составу химические компонента.

Показатели инженерно-геологического строения:

- Плотность основных разновидностей дисперсных грунтов четвертичных отложений, г/см³;
- Коэффициент пористости основных разновидностей дисперсных грунтов четвертичных отложений, д.е.

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

карстоопасности. За редким исключением прогнозные модели карстовой опасности неверно трактуют действительную обстановку. С.В. Щербаков и В.Н. Катаев связывают с проблемным характером изначальных распределений показателей строения природной среды, по анализу которых делается вывод относительно реальной карстоопасности.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ТЕРРИТОРИИ

Пилотными в данном исследовании послужили закарстованные массивы горных пород, развитые в пределах Пермского края – это территория г. Кунгур, территория пгт Полазна, территория энергокоридора трансрегионального газопровода высокого давления «Ямбург-Елец» на участке Красноясыльского полигона (близ пос. Красный Ясыл Ординского района), территория пос. Октябрьский (рисунок 2.1). Эти территории приурочены к площадям развития сульфатно-карбонатного карста. Природные условия карстообразования в их пределах активно изучались на протяжении последних 50-60 лет, в результате чего был накоплен обширный фактический материал, сбор, переработка и систематизация которого частично осуществлены в ходе пятилетней (2006-2010 гг.) научно-исследовательской работы в рамках краевой программы «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области» [268].

Рассматриваемые территории приурочены к области умеренно-континентального климата, формирующегося под влиянием западных циклонов, приносящих обогащенные влагой воздушные массы с Атлантики. Зима в пределах исследуемых территорий длительная, многоснежная и холодная с частыми метелями, лето – короткое умеренно-теплое. Частые циклоны смягчают ход температуры, приносят зимой оттепели, а летом прохладную погоду. Среднегодовая температура изменяется по площади от -1,6 до 2,1°C. Среднемесячные температуры воздуха имеют выраженный годовой ход с минимумом в январе (-15,5°C) и максимумом в июле (18,4°C). Продолжительность безморозного периода при движении с севера (территория пгт Полазна) на юг (территория пос. Октябрьский) закономерно снижается с 115 до 100 дней в году [171].

Исследуемые площади относятся к зоне достаточного увлажнения. На режим и количество атмосферных осадков наиболее сильно влияют два фактора: атмосферная циркуляция, с которой связано перемещение циклонов, и наличие Уральских гор, усиливающих выпадение атмосферных осадков. За год выпадает в среднем 500 мм осадков (125 мм – в холодный, 375 мм – в теплый периоды). Максимум – 650, минимум – 304 мм. В течение года осадки распределяются неравномерно: максимум (68-80%) приходится на летний период (V-X). Осадки выпадают в основном в виде дождя, большей частью в виде ливней, в холодный период (XI-IV) – в основном в виде снега. Устойчивый снежный покров сохраняется в среднем 150-190 дней, средняя максимальная декадная высота снега варьирует в пределах 50-67 см. Почвы промерзают до глубины 40-87 см. Полное оттаивание почвы происходит в конце апреля, начале мая. Многолетней мерзлоты в пределах исследуемых территорий нет. Средняя глубина промерзания грунтов зависит от их разновидностей и сочетания в приповерхностном разрезе и изменяется от 1,0 до 2,5 м.

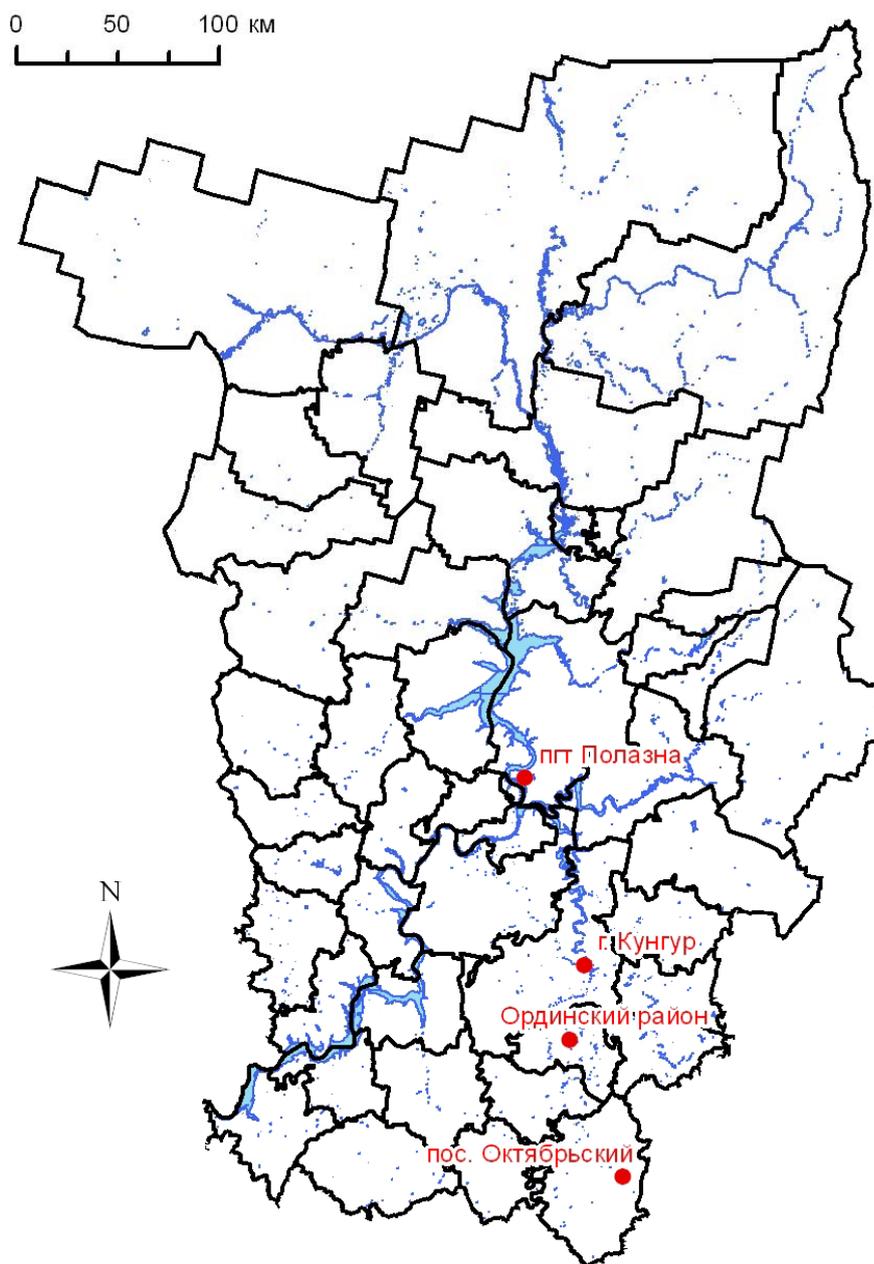


Рисунок 2.1. Пермский край – схема расположения исследуемых территорий

Ветровой режим исследуемых территорий определяется метеорологическими условиями, а также особенностями подстилающей поверхности и открытостью местоположения. В течение года направление ветра существенно изменяется. В январе господствуют юго-западные и западные ветра, в летние месяцы преобладают северные ветра. Среднегодовая скорость ветра изменяется от 3,2 до 3,6 м/с. Максимальная скорость ветра наблюдается в марте-мае и в октябрь-ноябре, наименьшая – отмечается в июле-августе.

Согласно схеме геоморфологического районирования Пермского края [1979] исследуемые территории приурочены к восточной оконечности Восточно-Европейской равнины, области Камских равнин, увалов и возвышенностей, и локализованы в пределах трех районов. Поселок

Октябрьский и исследуемый участок трассы магистрального газопровода в Ординском районе приурочены к району Уфимского плато с Сылвинским кряжем. Территория г. Кунгура расположена на северной оконечности Уфимского плато, на его границе с Лысьвинско-Тулумбасской возвышенной равниной. Л.А. Шимановский [168] приосевую часть Уфимского плато, сложенную кунгурскими доломитами и артинскими известняками выделяет в отдельный подрайон. Поселок городского типа Полазна локализован в пределах Полазненского полуострова, приуроченного к Среднекамской долине, граничащей с востока с Лысьвинско-Тулумбасской возвышенной равниной (рисунок 2.2, А).

Уфимское плато представляет широкую плоскую возвышенность со средними абсолютными отметками 340-400 м (в районе пос. Октябрьский – 325-350 м), постепенно понижающуюся к северо-западу до 180-300 м в районе трассы газопровода в Ординском районе и 110-220 м в пределах территории г. Кунгур. Плато глубоко расчленено долинами рек Уфы, Сарса, Сылвы и их притоками. Современный рельеф района холмисто-увалистый [45]. Перепад высот в пределах плато составляет 150-300 м и закономерно снижается в северо-западном направлении до 70-110 м. Обнаженность района плохая. Коренные породы вскрываются, в основном, на склонах наиболее глубоко врезанных речных долин. В большинстве случаев водоразделы и склоны прикрыты чехлом рыхлых элювиально-делювиальных отложений и задернованы.

Среднекамская долина в районе Полазненского полуострова имеет абсолютные отметки 108-175 м. Западный и южный склоны полуострова более пологие, сильно расчленены. Полуостров разрезают многочисленные балки, переходящие в крутостенные овраги [42]. Поверхность территории пгт Полазна осложнена крутыми склонами. Северные склоны побережья залива подвержены овражным, осыпным, обвальным процессам. Берега залива во многих местах размыты, вследствие воздействия на них абразионной деятельности волн. Осыпные и обвальные процессы имеют различные масштабы проявления. Присутствуют как небольшие по высоте и простираию осыпи с незначительными уклонами (20-30°), так и крупные обвалы с крутым почти отвесным склоном (70-80°). Многие обвалы разделяются на блоки трещинами выветривания. По всему побережью на склонах присутствуют овраги.

Различие геоморфологических обстановок, к которым приурочены рассматриваемые площади, предопределяет особенности их гидрологических условий. Поселок городского типа Полазна расположен в прибрежной черте Камского водохранилища в меандре р. Кама, огибающей поселок с запада. Территория г. Кунгура приурочена к долине водотока второго порядка – р. Сылва (левый приток р. Чусовой) и ее притоков (рр. Ирень и Шаква). Поселок Октябрьский локализован в пределах долины правого притока р. Сарс – р. Чад (водоток 4 порядка). Участок газопровода в Ординском районе приурочен к водораздельному пространству

рр. Сылва и Ирень и их притоков – рр. Кунгурка, Ясыл. В районе участка трассы развиты небольшие карстовые водотоки, имеющие сезонный характер.

Реки рассматриваемых территорий относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. Для меженных периодов характерны устойчивые и низкие уровни. Расходы в это время падают до 2-5% от годового стока. В питании рек преимущественное значение имеют снеговые и дождевые воды, но благодаря закарстованности водосборных площадей повышена роль подземного питания. Вскрытие рек происходит во второй декаде апреля – начале мае. Крупные реки имеют трапециевидные долины, их более мелкие притоки – мешкообразные. В долинах рек прослеживается комплекс речных террас.

Для Пермского края характерно меридиональное структурно-тектоническое строение. С запада на восток восточная часть Восточно-Европейской платформы сменяется Предуральским прогибом и затем геосинклинально-складчатой областью герцинского складчатого Урала. Восточная окраина платформы, где развит карст, осложнена крупными структурами: Тиманским кряжем, Пермским сводом, Быско-Кунгурской моноклиальной впадиной и северным окончанием Башкирского свода, в пределах которого выявлены мелкие структуры.

В структурно-тектоническом отношении согласно схеме районирования ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» исследуемые территории приурочены к крупным положительным структурам, характеризующимся приподнятым залеганием коренных пермских отложений (рисунок 2.2, Б). Территория Полазненского полуострова и пгт Полазна локализована в пределах Пермского свода. Город Кунгур и исследуемая часть участка трассы магистрального газопровода в Ординском районе приурочены к Быско-Кунгурской моноклинали. Поселок Октябрьский расположен в приграничной зоне между Быско-Кунгурской моноклиалью и Башкирским сводом. В структурно-тектоническом плане исследуемых районов выделяется ряд более мелких структур.

Полазненский п-ов расположен на северо-восточной окраине Пермского свода в пределах Межевской валообразной зоны (структура III порядка). Эта структура относится к категории тектоно-седиментационных, сформировавшихся в бортовой зоне Камско-Кинельской системы прогибов. По кровле фаменского яруса она представляет собой отчетливо выраженное рифогенное сооружение позднедевонского возраста, осложненное цепью мелких структур. Западную часть Межевской валообразной зоны осложняет Полазненское поднятие, представляющее собой асимметричную брахиантиклиналь с широким сводом, крутым северо-западным и пологим юго-восточным крылом, прослеживающуюся по девонским, каменноугольным и нижнепермским отложениям (структура V порядка). Крылья поднятия выполаживаются от более древних отложений к молодым.

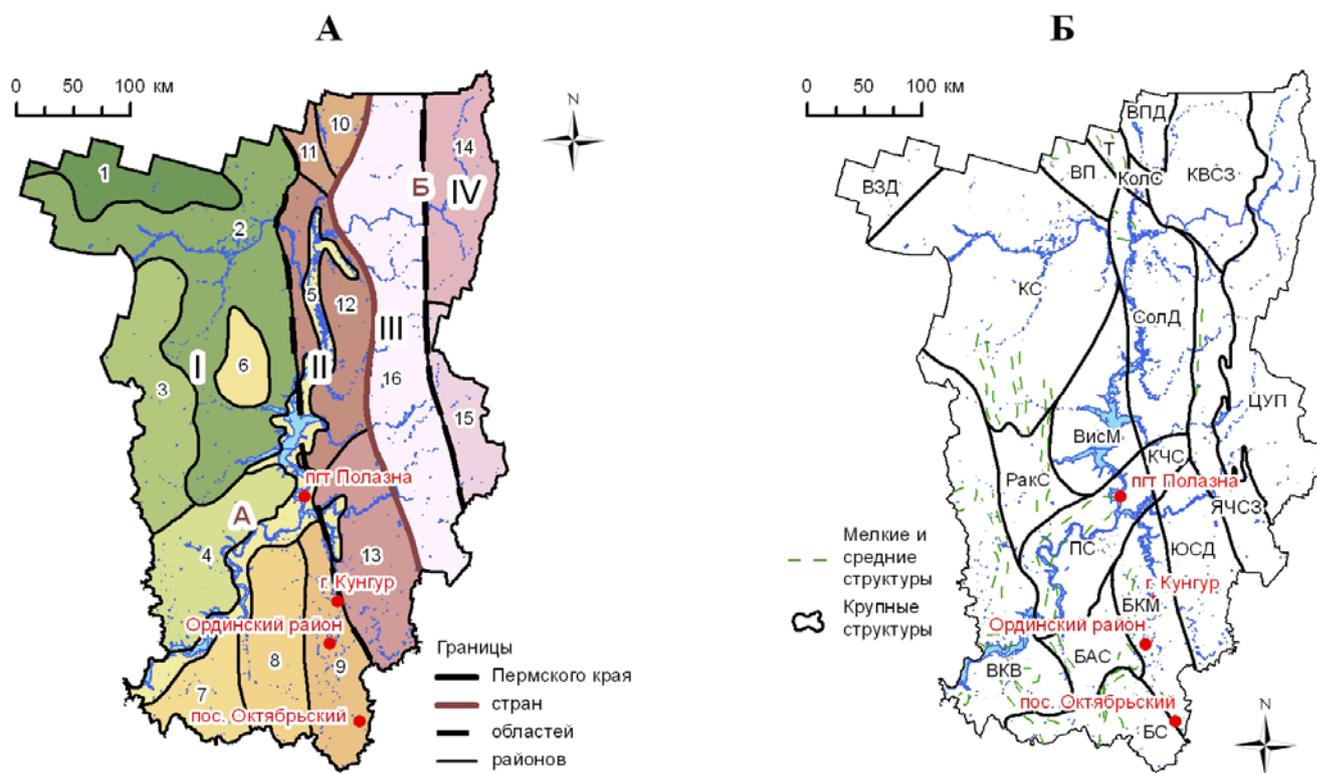


Рисунок 2.2. Расположение исследуемых территорий на схемах геоморфологического (А) и структурно-тектонического (Б) районирования Пермского края

Условные обозначения к схеме А [105]. *Границы*: 1 – Пермского края, 2 – стран, 3 – областей, 4 – районов. *Страны*: А – Восточно-Европейская равнина, Б – Складчатый Урал. *Области*: I – Камских равнин, увалов, возвышенностей, II – Предуральских равнин и кряжей, III – западных увалистых предгорий, IV – горного Урала. *Районы*: 1 – Северные увалы, 2 – Верхнекамская равнина, 3 – Верхнекамская возвышенность, 4 – Верещагинско-Васильевские увалы, 5 – Среднекамская долина, 6 – Верхне-Кондасские увалы, 7 – Усинская возвышенность, 8 – Тулвинская возвышенность, 9 – Уфимское плато с Сылвинским кряжем, 10 – Колво-Вишерская равнина, 11 – Полудов кряж, 12 – Соликамская равнина, 13 – Лысьвинско-Тулумбасская возвышенная равнина, 14 – Среднегорный Северный Урал, 15 – Низкогорный Средний Урал.

Условные обозначения к схеме Б (составлена по материалам ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», 2012): КС – Камский свод; ВЗД – Вятская зона дислокаций; ВПД – Верхнепечорская депрессия; Т – Тиманский кряж; ВП – Вычегодский прогиб; КолС – Колвинская седловина; ЦУП – Центрально-Уральское поднятие; КВСЗ – Кожимско-Вишерская структурная зона; ЯЧСЗ – Язьвинско-Чусовская структурная зона; ВКВ – Верхнекамская впадина; ВисМ – Висимская моноклинал; РакС – Ракшинская седловина; ПС – Пермский свод; СолД – Соликамская депрессия; КЧС – Косьвинско-Чусовская седловина; ЮСД – Юрюзано-Сылвенская депрессия; БКМ – Бымско-Кунгурская моноклинал; БАС – Бабкинская седловина; БС – Башкирский свод.

Участок трассы газопровода расположен в пределах развития Веслянского вала Бымско-Кунгурской моноклинали, сложенного преимущественно нижнепермскими породами.

В тектоническом отношении территория г. Кунгур приурочена к северной оконечности Уфимского вала, его западному крылу, которое выделяется приподнятым залеганием нижнепермских отложений. В его пределах наблюдается моноклинальное залегание горных пород с постепенным погружением на запад и северо-запад. Господствующая трещиноватость пород имеет разную природу. Кунгурский район представляет антиклинальную структуру, имеющую асимметричное строение: восточное крыло крутое и узкое, западное – пологое и широкое. Наблюдаемые формы залегания крыльев связаны с эндо- и экзотектоникой и облеканием рифовых массивов. На тектонические формы и формы облекания рифовых массивов

в полосе распространения гипсо-ангидритовых отложений накладываются карстовые дислокации, появление которых связано с растворением. В результате в гипсоангидритах и перекрывающих пластах возникают разнообразные складчатые и разрывные нарушения.

В районе пос. Октябрьский Башкирский свод осложнен крупной плакантиклинальной структурой – Уфимским валом, хорошо выраженным по пермским (артинским) отложениям, представленным органогенными и рифовыми известняками. Однако Уфимский вал не прослеживается по нижележащим горизонтам. Он исчезает в подошве нижнепермских отложений [139]. В районе поселка на фоне поднятия Уфимского плато выделяется ряд структур более низкого порядка. С севера прослеживается Верхнешуртанская брахиантиклиналь, а на южной оконечности выделяется Каменское поднятие. Верхнешуртанская брахиантиклиналь характеризуется погружением кунгурских отложений нижней перми. Каменское поднятие выделено по кровле артинского яруса, его высота достигает 30 м [112].

В пределах исследуемых территорий наблюдается высокая неотектоническая активность. Амплитуда неотектонических поднятий достигает 200-250 м. Здесь проявляются и региональные и дифференцированные движения. Близкое расположение Предуральского прогиба, испытывающего относительные опускания, обусловило интенсивное развитие новейшей тектонической трещиноватости нижнепермских пород. Наличие глубинных разломов и неравномерное вертикальное перемещение блоков пород относительно друг друга предопределили расположение зон повышенной неотектонической трещиноватости пород вблизи земной поверхности. Неотектонические движения земной коры и вызванные ими трещинные нарушения имеют важное практическое значение. С ними тесно связана активизация карстовых процессов [104], формирование рельефа земной поверхности [167].

В геологическом строении приповерхностной части осадочного чехла исследуемых территорий принимают участие породы пермской, неоген-четвертичной и четвертичной систем [141] (рисунки 2.3, 2.4).

Пермская система Р представлена отложениями артинского (P_{1a}), кунгурского (P_{1kg}) и уфимского (P_{1uf}) ярусов нижнего отдела (рисунок 2.5, А).

Артинский ярус. По литолого-фаунистическим признакам ярус расчленяется снизу вверх на объединенные *бурцевский* и *иргинский* (P_{1a}^{irg}) горизонты, *саргинский* (P_{1a}^{sg}) и *саранинский* (P_{1a}^{sr}) горизонт. Иргинский горизонт представлен отложениями одноименной свиты. В составе саргинского горизонта выделяются отложения *камайской* и *шуртанской свит*, а также *сылвенские рифы*. В пределах Уфимского плато (пос. Октябрьский, Ординский район, г. Кунгур) наибольшее развитие получили карбонатные отложения иргинской и камайской свит.

Иргинская свита имеет широкое распространение в южной части Уфимского плато (пос. Октябрьский), вскрываясь в долинах рек Уфы, Сарса, Аяза и др. Она фаунистически

расчленяется на три пачки. В основании свиты залегают серые, желтовато-серые глинистые органогенно-обломочные известняки с ясной равномерной слоистостью (нижняя фузулиновая пачка). Для пород характерно сильное окремнение, имеющее вид крупных неправильной формы линз или желваков. Мощность отложений непостоянна и колеблется от 45 до 90 м. Залегающая выше мшанково-брахиоподовая пачка сложена глинистыми плитчатыми известняками. Встречаются прослои глинистых сланцев мощностью до 15 м и маломощные, до 0,2 м, прослои глин и мергелей. Мощность отложений пачки изменяется от 70 до 80 м. В составе верхней части иргинской свиты (верхняя фузулиновая пачка) преобладают слоистые органогенно-детритусовые известняки слабо глинистые, слабо окремненные серого или зеленовато-серого цвета. Мощность отложений изменяется от 10 до 30 м. Общая мощность иргинской свиты достигает 200 м.

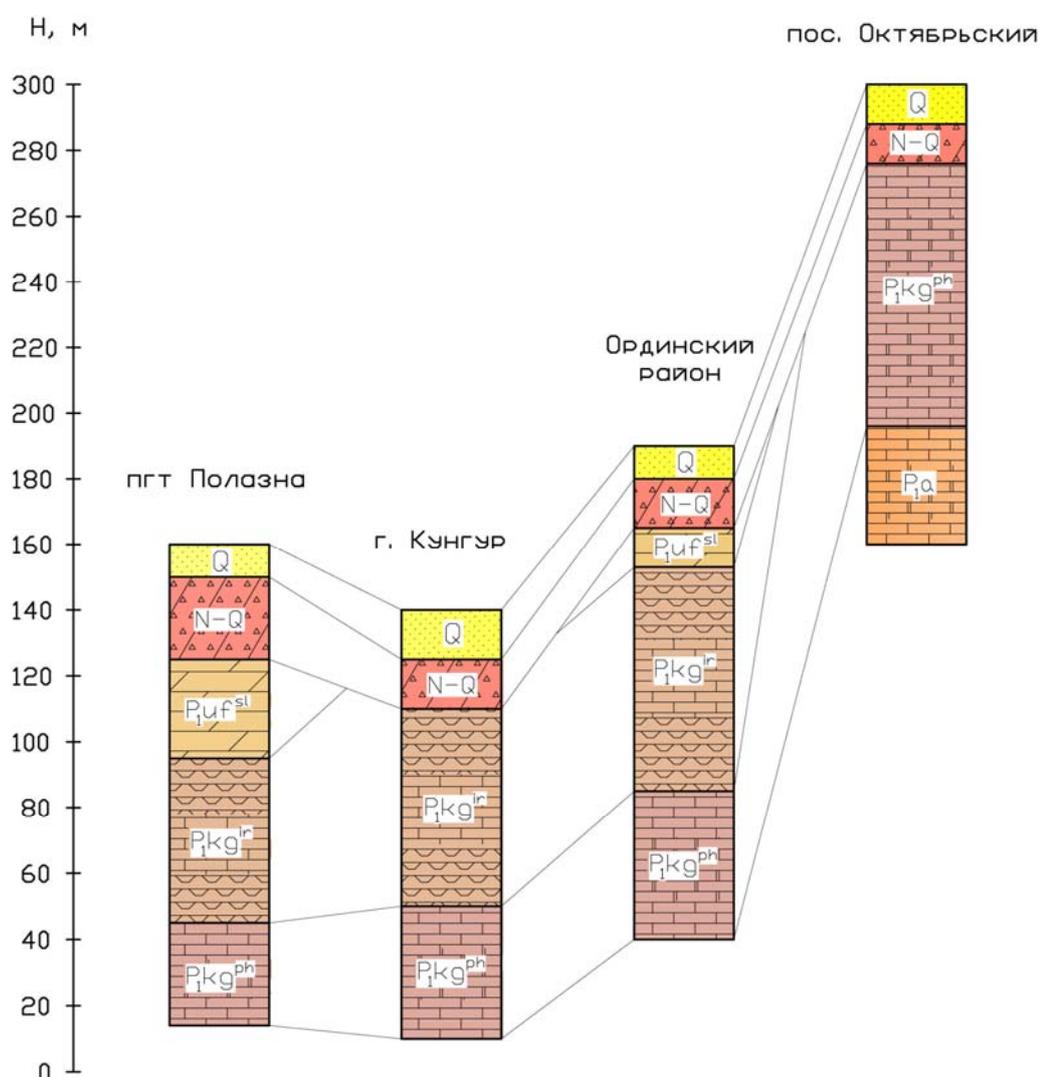


Рисунок 2.3. Схематические типовые геологические разрезы в пределах исследуемых территорий

Отложения саргинского и саранинского горизонтов наиболее развиты в юго-восточной части Уфимского плато (пос. Октябрьский). При продвижении на север породы постепенно

погружаются на глубину и в районе г. Кунгур и пгт Полазна встречаются только в разрезе глубоких скважин (до 300 м). Камайская свита саргинского горизонта сложена слоистыми доломитизированными известняками, обычно в той или иной степени глинистыми. Чистые разности известняков встречаются преимущественно в отложениях саранинского горизонта (г. Кунгур). В северной части плато известняки почти нацело окремнены. К югу окремнение уменьшается. Мощность свиты уменьшается от 40 до 80 м. Фациальным аналогом камайской свиты являются сылвенские водорослевые рифы, развитые в Центральной части Уфимского плато (северо-восток района). Форма рифов линзообразная или пластовая. Ядро рифов сложено массивными светло-серыми известняками, в краевых частях известняки становятся темноокрашенными неяснослоистыми слабглинистыми. Средняя мощность рифов 20 м, иногда достигает 30-40 м. Сылвенские рифы обычно сопровождаются и частично облекаются слоистыми глинистыми известняками (шуртанская свита) мощностью до 5-10 м.

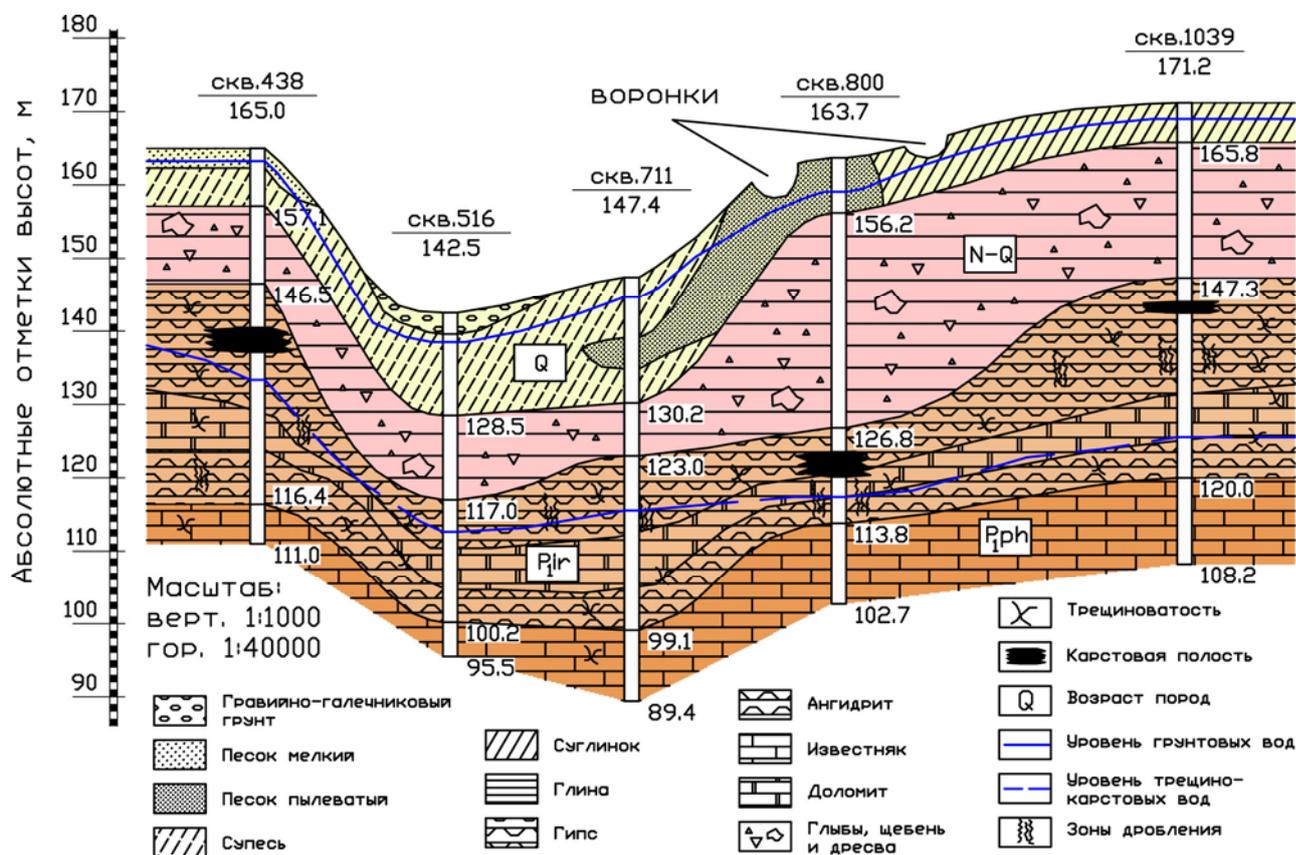


Рисунок 2.4. Наиболее типичный геологический разрез в пределах исследуемых территорий (на примере г. Кунгур)

Кунгурский ярус сложен карбонатно-сульфатной толщей, залегающей с перерывом на подстилающих артинских породах. Ярус расчленяется на два горизонта: *филипповский* (P_1kg^{ph}) и *иренский* (P_1kg^{ir}).

В разрезе филипповского горизонта господствуют слоистые белые, желтовато-серые и серые оолитовые доломиты, доломитизированные известняки с фауной пелеципод и брахиопод с линзами и прослоями глин, мергелей, алевролитов и песчаников. В верхней части горизонта встречаются прослойки ангидрита. На территории пгт Полазна отложения филипповского горизонта вскрываются на глубине 51,5-119,0 м от поверхности земли, а мощность отложений составляет 20-40 м. Филипповские доломиты и известняки практически повсеместно развиты на территории г. Кунгур, где их мощность колеблется от 50 до 80 м. В Ординском районе мощность филипповских отложений увеличивается до 30-100 м, а кровля филипповского горизонта прослеживается на глубинах 70-150 м. Наиболее широко эти отложения представлены в разрезе пос. Октябрьский, где они являются основной карстующейся толщей пород, а их мощность достигает 60-80 м.

Иренский горизонт представлен семью пачками, четыре из которых – сульфатные, три – карбонатные. Классический порядок залегания пачек в разрезе снизу вверх и их состав следующие:

- Ледянопещерская – преобладают голубовато-серые ангидриты, меньше распространены гипсы.
- Неволинская – сложена в основном серыми и светло-серыми доломитами и оолитовыми известняками, редко с прослоями аргиллитов, доломиты часто загипсованы.
- Шалашнинская – представлена гипсами белыми, зернисто- и скрытокристаллическими, массивными ангидритами с прослойками серых доломитов.
- Елкинская – представлена серыми и светло-серыми доломитами, доломитизированными известняками, известняками, в том числе и органогенно-обломочными, с прослойками аргиллитов, маломощными линзами ангидрита.
- Демидковская – сложена голубовато-серыми массивными гипоангидритами с прослоями доломита и гнездами селенита.
- Тюйская и лунежская пачки представлены известняками, доломитами, аргиллитами и гипсоангидритами серыми, светло-серыми, голубовато-серыми с прослоями доломита.

Отложения иренского горизонта в полном составе представлены на территориях пгт Полазна, г. Кунгур и в пределах исследуемого участка трассы в Ординском районе. В границах Полазненского городского поселения породы иренского горизонта вскрыты скважинами на глубинах 0,0-114,0 м, а их общая мощность достигает 90-115 м. На территории г. Кунгур суммарная мощность иренского горизонта составляет 110-130 м. Отложения горизонта выходят на дневную поверхность в пределах массива Ледяная гора, а в междуречье рек Сылвы и Ирень в восточной части города они выклиниваются из геологического разреза. На участке трассы газопровода «Ямбург-Елец», проходящей через территорию Ординского района общая

мощность иренских отложений достигает 133-145 м, а глубина их залегания варьирует от 0,0 до 25,0 м. На территории пос. Октябрьский породы иренского горизонта в разрезе не представлены.

Уфимский ярус представлен *соликамским* (P_{1uf}^{sl}) и *шешминским* (P_{1uf}^{ss}) горизонтами, залегающими на размывтой поверхности гипсоангидритовой толщи иренского горизонта кунгурского яруса.

Соликамский горизонт слагают терригенно-карбонатные отложения, представленные плитчатыми мергелями, песчаниками, конгломератами, аргиллитами с прослойками известняков и доломитов. Породы часто сильнотрещиноватые и сильновыветрелые. Мергели имеют светло-серый, коричневато-серый цвет и представлены тонкослоистыми разновидностями. Прослойки известняков светло-серые, темно-серые и светло-коричневые, сильнотрещиноваты и кавернозные. Трещины в известняках открытые, заполнены глинистым материалом или выполнены кальцитом. Количество прослоев известняков возрастает с глубиной. Отложения соликамского горизонта вскрыты на территории пгт Полазна и исследуемого участка трассы в Ординском районе на глубинах 0,5-5,0 м и имеют мощность, соответственно, 10-40 м и 30-40 м.

Шешминский горизонт, сложенный аргиллитами, алевролитами с прослоями и линзами песчаников и известняков обнаруживается в пгт Полазна в виде небольших участков.

Неоген-четвертичная система N-Q представлена обвальными карстовыми отложениями (карстовой брекчией), состоящими из дресвы, щебня и глыб коренных терригенно-карбонатных и сульфатных пород с примесью песчано-глинистого и гравийного материала. Ее формирование связывается с проявлением карстовых процессов. В разрезе толщи часто встречаются ослабленные зоны и небольшие пустоты (0,1-0,2 м), образовавшиеся в результате недостаточного уплотнения обрушенных пород. Мощность этих зон составляет 2-4 м, достигая в отдельных случаях 10 м [139]. На различных глубинах в карстовой брекчии встречаются линзы песков и гравийно-галечникового материала. Характерной особенностью отложений является полимиктовый состав галек, их угловатая и плоская окатанность, яркая и пестрая окраска и ритмичность отложения (от галечников в основании до крупнозернистых и среднезернистых песков в верхней части). В основании карстовой брекчии всегда залегают коренные карстующиеся породы, за исключением сильно разрушенных участков. Поверхность кровли карстующихся отложений неровная, со следами выщелачивания. Мощность карстово-обвальных отложений весьма изменчива и резко колеблется на коротких расстояниях. Максимальной величины (до 40-60 м) она достигает на водораздельных пространствах. В местах интенсивного развития современного и древнего карста мощность карстовой брекчии может достигать 100 и более метров [91].

На территории пгт Полазна формирование неоген-четвертичной толщи связано, главным образом, с разрушением известняково-мергелистых пород соликамского горизонта. В пределах

территории г. Кунгур развиты известняковые и доломитовые брекчии, образованные в результате выщелачивания гипсоангидритовых пачек и последующего обрушения карбонатных пород в карстовые полости [91]. В пределах исследуемой части Ординского района карстово-обвальные отложения связаны с нарушением залегания как соликамских терригенно-карбонатных, так и иренских сульфатно-карбонатных пород. Их общая мощность достигает 10-35 м. В геологическом строении территории пос. Октябрьский обвальными-карстовые отложения часто ассоциируются с ольховской брекчией, формирование которой связано с разрушением пород верхней части филипповского горизонта [39]. Ее мощность достигает 35-45 м.

Четвертичная система Q на исследуемых территориях представлена разными генетическими типами. Шире всего развиты аллювиально-делювиальные и элювиально-делювиальные глинистые, песчано-глинистые и песчано-гравийно-галечниковые отложения (рисунок 2.5, Б). Общая мощность четвертичных отложений колеблется от 0,2-5 до 50 м. Среди них на разной глубине встречаются линзы органо-минеральных грунтов.

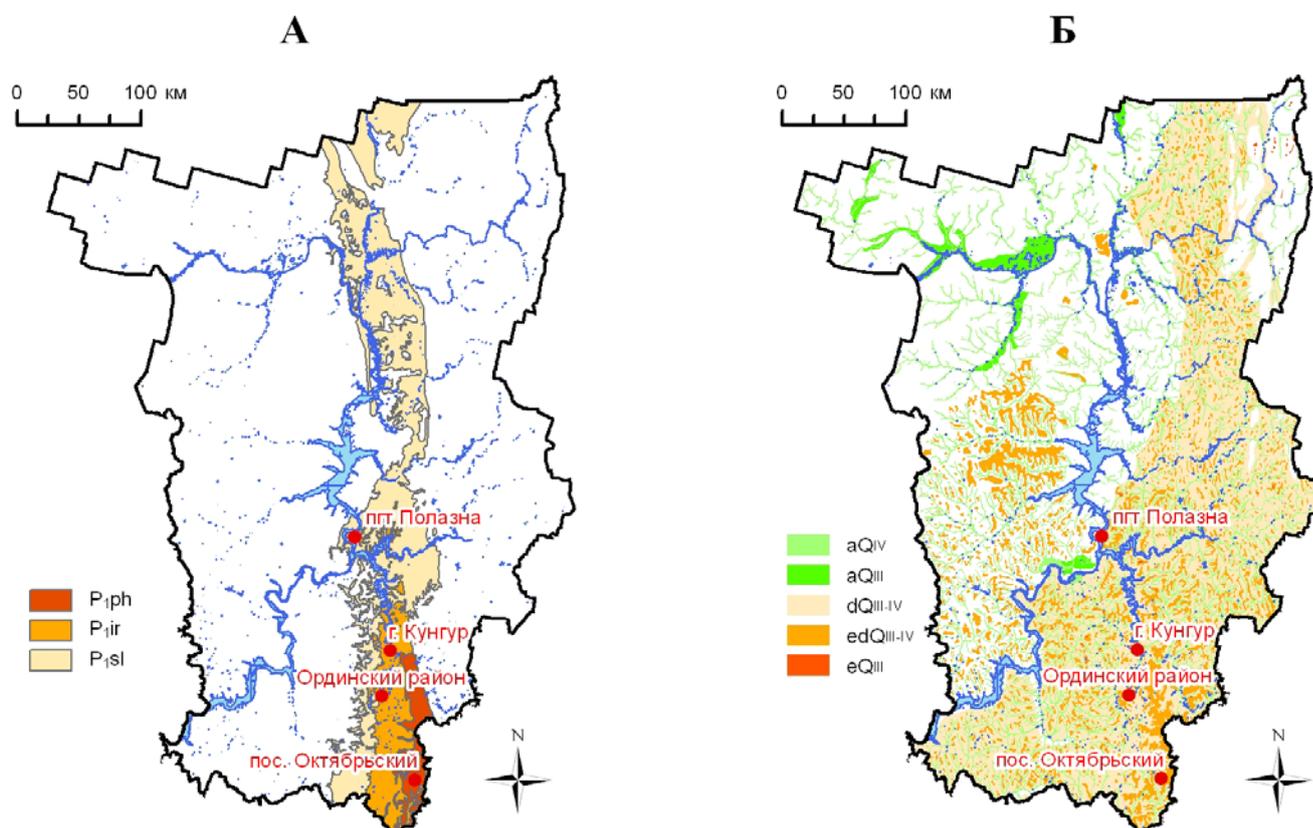


Рисунок 2.5. Расположение исследуемых территорий на схемах распространения коренных (А) и четвертичных отложений (Б) (составлены по материалам ОАО «Геокарта-Пермь», пояснения см. в тексте)

Аллювиальные ($aQ_{III}-aQ_{IV}$) отложения приурочены к поймам рек и первым надпойменным террасам. Чаще всего это супеси, пески с линзами суглинков, погребенного торфа и гравийно-галечниковый материал. В верхней части разреза преобладают суглинки, супеси и кварцевые пески пылеватые и мелкие, в нижней – пески от средней крупности до гравелистых и гравийно-

галечниковые отложения. Пески обычно коричневые, серые, мелкие, редко пылеватые или средней крупности, плотные, средней плотности, маловлажные и влажные участками с тонкими линзами и прослоями суглинки, с отдельными находками гравия и гальки. Пески залегают с поверхности или под почвенно-растительным слоем. Суглинки коричневые, серые, от твердых до тугопластичных, с включением дресвы и щебня сильно выветрелых мергеля и реже известняка, с редким гравием и галькой. Иногда отмечаются линзы песков, чаще всего пылеватых и мелких, супеси. Мощность аллювия небольших рек редко превышает 1-5 м, более крупных достигает 10-25 м.

Аллювиально-делювиальные (adQ_{III-IV}) отложения вскрыты в виде шлейфов вдоль крутых склонов низких террас и представлены суглинками и супесями, реже глинами. Суглинки и глины коричневые, бурые, серовато-коричневые, тугопластичные с дресвой и щебнем коренных пород. Супеси буровато-коричневые, пластичные, с дресвой и щебнем коренных пород. Мощность их обычно не более 2-4 м

Делювиальные (dQ_{III-IV}), *элювиально-делювиальные* (edQ_{III-IV}) и *элювиальные* (eQ_{III}) образования развиты в пределах высоких террас и водоразделов на склонах долин. Это отложения сложного генезиса (результат ледниковой и эрозионной деятельности, плоскостного смыва, выветривания, выщелачивания). Часто представлены глинистыми грунтами, пестроцветными, твердые и полутвердые, с включением дресвы, щебня и отдельных выветрелых, сильнотрещиноватых глыб мергеля, известняка, доломита, аргиллита, реже гипса и ангидрита. Отмечаются редкий гравий и галька, скопления песка небольшой мощности. Размер глыб от первых десятков сантиметров до первого десятка метров. Распределение крупнообломочного материала по разрезу и в плане неравномерное. На отдельных участках преобладает щебень, дресва с глинистым заполнителем. Элювиально-делювиальные отложения часто представлены специфическими грунтами (просадочными суглинками и супесями, набухающими глинами). Мощность делювия и элювия может изменяться в широких пределах – от 2-4 м до 40 м (вследствие трудности установления нижней границы их мощность может быть и больше).

Техногенные (tQ_{IV}) образования представлены в основном насыпными, намного реже намывными грунтами разного состава и возраста мощностью до 5-8 м.

В гидрогеологическом отношении согласно схеме районирования Пермского края по условиям водоснабжения Л.А. Шимановского и И.А. Шимановской (1973) исследуемые территории относятся к провинции подземных вод восточной окраины Русской платформы и локализованы в пределах области карстовых вод Уфимского плато. Территория пгт Полазна расположена в приграничной зоне между областями Уфимского плато и Камских трещинно-грунтовых и трещинно-пластовых вод линзовидных коллекторов.

В гидрогеологическом строении зоны активного водообмена (до глубины 100 м) в пределах исследуемых территорий выделяется до 6 пяти региональных водоносных горизонтов:

- 1) верховодка;
- 2) грунтовые воды четвертичных отложений;
- 3) трещинно-пластовые воды соликамского горизонта;
- 4) подземные воды карстово-обвальных отложений;
- 5) трещинно-карстовые воды иренского горизонта;
- 6) трещинно-карстовые воды артинско-филипповской серии.

Основным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки. Отсутствие региональных водоупоров, а также взаимно перпендикулярная система трещин, пересекающая исследуемые массивы, способствует гидравлической связи подземных вод различных водоносных горизонтов. Различный литологический состав водовмещающих пород обуславливает разную гидродинамику и химический состав как грунтовых, так и карстовых вод.

Верховодка имеет локальное распространение и проявляется в периоды дождей и снеготаяния преимущественно на контактах грунтов с различными фильтрационными свойствами. Она обычно приурочена к элювиально-делювиальным пескам, суглинкам и супесям высоких террас и встречается в пониженных участках рельефа. Водоупором как правило служат элювиально-делювиальные суглинки и глины. Часто верховодка приурочена к техногенным грунтам. В пределах территории г. Кунгур верховодка встречается в линзах песчанистых суглинков, супесей и песков на глубинах 4,0-12,0 м на высоких и 0,5-2,5 м на низких террасах. В границах Полазненского городского поселения верховодка наблюдается на абсолютных отметках 115-140 м, реже на участках с отметками более 140 м на глубине 0,3-2,5 м от поверхности земли. Верховодка имеет спорадическое распространение на территории исследуемой площадки в Ординском районе и приурочена к старым засыпанным воронкам, склонам логов на глубинах 2,0-6,0 м, а также развита под трубами газопроводов на глубине 2,0-3,0 м от трубы. На территории пос. Октябрьский подземные воды типа верховодка встречаются в пределах высоких террас р. Чад и приурочены к супесчано-суглинистым отложениям делювиального генезиса.

Грунтовые воды. Водоносные горизонты исследуемых районов приурочены в основной массе к аллювиально-делювиальным отложениям, представленным песчано-гравийно-галечниковой смесью, реже супесчано-суглинистыми грунтами и залегают на глубине 3-35 м. Горизонт грунтовых вод, как правило, безнапорный с небольшими локальными местными напорами. Питание грунтовых вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, поступления трещинно-карстовых вод, а в прибрежных участках за счет подпора речными водами. Причины колебания уровней грунтовых вод аллювиальных отложений бывают различные. В основном, уровенный режим подземных вод горизонта находится в тесной связи с режимом рек.

Наиболее значительны и закономерны сезонные колебания уровней. Максимальные уровни наблюдаются обычно в мае и сентябре-октябре. Минимум падает на февраль-март, иногда на январь. Летом минимум наблюдается в июле-августе. Амплитуда сезонных колебаний уровня достигает в прирусловых частях 3 м.

На территории пгт Полазна грунтовые воды развиты на II-III надпойменных террасах вдоль береговой линии Камского водохранилища в полосе шириной 10-100 м.

В пределах г. Кунгур грунтовые воды приурочены: 1) к песчано-гравийно-галечниковым отложениям поймы и частично первой надпойменной террасы рек Сылвы и Шаквы и залегают на глубинах от 10-15 м до 20-36 м; 2) к покровным преимущественно глинистым отложениям I надпойменной террасы, где залегают на глубине 0,1-3,0 м; 3) к пескам, гравийно-галечниковым отложениям, супесям и суглинками II надпойменной террасы с глубиной залегания уровня 5,0-20,0 м.

Грунтовые воды на территории пос. Октябрьский приурочены к относительно маломощным аллювиальным отложениям (в среднем до 5-15 м) пойменных, а также I и II надпойменных террас р. Чад. Аллювий разнороден в разрезе и в плане и представлен галечником, песком разной крупности и глинистым материалом. Уровень подземных вод залегают на глубине до 3-12 м. Во многих случаях аллювий полностью осушен в связи с глубоким положением уровня подземных вод в нижележащих водоносных горизонтах.

Трещинно-пластовые воды соликамского горизонта уфимского яруса приурочены к карбонатно-терригенной толще, представленной песчаниками, аргиллитами, алевролитами, известняками, доломитами и мергелями. Роль водоупора обычно выполняют мергелистые глины. Трещинно-пластовые воды весьма невыдержанны по площади, ввиду частого нарушенного залегания соликамских отложений. Питание вод осуществляется главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгружаются они в нижележащие горизонты, где залегают трещинно-карстовые воды. На территории пгт Полазна и окрестностей трещинно-пластовые воды безнапорны и встречены на глубине от 4 до 26 м от поверхности земли. В пределах исследуемого участка Ординского района трещинно-пластовые подземные воды практически не развиты.

Подземные воды карстово-обвальных отложений имеют спорадическое распространение, часто встречаются в тальвегах логов, реже на поверхностях локальных водоразделов. Однако в целом неоген-четвертичные карстово-обвальные отложения оказываются безводными. Этот тип вод приурочен к глинистым отложениям, перемешанным со щебнем и дресвой сульфатных и карбонатных пород. Им часто свойственен небольшой местный напорный характер фильтрации. Мощность водоносного горизонта зависит от наличия в разрезе относительно водоупорных слоев, трещинных зон, поноров. Питание вод смешанное – инфильтрационно-инфлюационное. Воды гидравлически связаны с трещинно-карстовыми водами карстующихся пород иренского горизонта, куда происходит их разгрузка. В пределах изученной части Ординского района подземные воды карстово-обвальных отложений встречены на глубинах 9,0-15,5 м, а их мощность не превышает 0,5-4,4 м. На территории пос. Октябрьский мощность горизонта изменяется от 1 до 5 м, однако чаще всего ольховская карстовая брекчия является почти безводной.

Трещинно-карстовые воды иренского горизонта кунгурского яруса приурочены к гипсоангидритам. Питание трещинно-карстовых вод происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, которые поглощаются в трещиноватых и закарстованных зонах. По характеру движения трещинно-карстовых вод в массиве выделяются зоны вертикальной нисходящей, переходной и горизонтальной циркуляции. Для горизонта характерна ярко выраженная разобщенность по вертикали в зависимости от литолого-стратиграфической принадлежности пород к различным пачкам. Воды, как правило, безнапорные. Исключение составляют воды локализованных зон, напор в которых определяется неоднородностью трещинной проницаемости – сменой фильтрационных характеристик трещинного коллектора зоны по потоку. Напор не исключается и в паводковые периоды, когда объемы поступления вод в массив превышают объемы разгрузки и дренажа этих вод. Разгрузка карстовых вод происходит в виде родников, дебиты которых весьма изменчивы.

Уровень воды зависит от состояния пород и степени трещиноватости массива и значительно выше в останцах карстующихся пород, чем в разрушенных зонах. В целом, уровень трещинно-карстовых вод наивысший на водораздельных участках и наиболее низкий у уреза поверхностных водотоков. Например, в пределах исследуемого полигона в Ординском районе глубина залегания карстовых подземных вод иренского горизонта изменяется в среднем от 8,4 до 34,7 м. Обводнены в основном гипсы верхней части разреза, ангидриты нижней части разреза обводнены спорадически.

Артинско-филипповская водоносная серия сложена доломитами и доломитизированными известняками филипповской свиты кунгурского и артинского ярусов. Из-за слабой изученности расчленение водоносного комплекса нижнепермских отложений на отдельные водоносные горизонты не представляется возможным. Глубина залегания подземных вод соответствует положению базисов эрозии и карста. Водообильность серии зависит от степени трещиноватости и закарстованности. Северная часть Уфимского вала обводнена довольно равномерно и подземные потоки, дающие начало крупным источникам, здесь редки. В районе г. Кунгур серия вскрыта скважинами на глубинах 10-150 м. Уровень артинско-филипповских вод (исключая подвешенные горизонты) в районе пос. Октябрьский вскрывается в широком диапазоне глубин, достигая на водоразделах 50-130 м.

Гидрохимические условия рассматриваемых районов характеризуются широкой изменчивостью как по разрезу, так и в площадном отношении. На химизм подземных вод определенное влияние оказывают климат и техногенная деятельность человека. Общая тенденция, характерная для всех карстовых районов заключается в возрастании минерализации с глубиной по мере уменьшения активности водообмена за счет увеличения содержания

сульфатов и хлоридов. Отмечается следующая последовательность смены фаций с глубиной: $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Ca-SO}_4 \rightarrow \text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca} \rightarrow \text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{SO}_4\text{-Ca-HCO}_3$ [169].

Например, средняя минерализация верховодки в пгт Полазна равна $0,284 \text{ г/дм}^3$, в то время как грунтовые воды характеризуются средним значением минерализации $0,656 \text{ г/дм}^3$, а трещинно-карстовые воды иренского горизонта – $2,519 \text{ г/дм}^3$ [116]. В зоне подпора минерализация трещинно-карстовых вод снижается до $1,0 \text{ г/дм}^3$. В карбонатных пачках на хорошо промытых участках могут содержаться пресные (до $0,5 \text{ г/дм}^3$) гидрокарбонатные кальциевые воды. Минерализация карстовых вод иренского горизонта в пределах исследуемой части территории Ординского района возрастает в зависимости от глубины их залегания и составляет $2,4\text{-}3,2 \text{ г/дм}^3$. Их состав преимущественно сульфатно-кальциевый.

Минерализация карстовых вод артинско-филипповского комплекса в местах перекрытия карстовой брекчией обычно не превышает 1 г/дм^3 , а в местах перекрытия иренскими отложениями достигает 3 г/дм^3 и более. Их минерализация как правило выше, чем подземных вод приуроченных к иренским отложениям. Подземные воды артинско-филипповских отложений часто содержат сероводород [170].

В пределах исследуемых территорий грунтовые воды преимущественно пресные, иногда слабосолоноватые (до $0,5 \text{ г/дм}^3$), от умеренно-жестких до очень жестких, преобладающей является гидрокарбонатно-кальциевая гидрохимическая фация. В широкой полосе присводовой части Уфимского вала, к которой приурочен пос. Октябрьский, минерализация подземных вод падает и обычно не превышает $0,25 \text{ г/дм}^3$.

Химический состав и минерализация подземных вод карстово-обвальных отложений находится в большой зависимости от водности сезона. Например, в меженный период для этих вод, развитых на территориях пгт Полазна, г. Кунгур и Ординского района характерны сульфатно-кальциево-натриевый состав и высокая минерализация, часто превышающая $1,5\text{-}2,0 \text{ г/дм}^3$. В паводковый период, в условиях разбавления поверхностными и грунтовыми водами, их состав в пределах указанных районов может изменяться на гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый, а минерализация падать до $0,6\text{-}0,8 \text{ г/дм}^3$.

Детальное изучение природных условий в пределах рассматриваемых территорий осуществлено в результате сбора, систематизации и анализа архивных отчетных материалов по бурению, опробованию и картированию различных природных процессов. Основным источником геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической информации послужили данные ранее проводившихся буровых работ и опробований грунтовых толщ и подземных вод. Геоморфологические и структурно-тектонические условия исследовались с применением

различных тематических картографических материалов, выполненных в крупном масштабе, а также аэро- и космоснимков.

На территории г. Кунгур по данным Кунгурской лаборатории-стационара ГИ УрО РАН в период с 1930 по 2008 гг. различными организациями пробурено 3719 скважин и шурфов. В пределах исследуемой территории Полазненского п-ова по данным архивных материалов ОАО «ВерхнеКамТИСИз», ОАО «Пермгипроводхоз», «Естественнонаучного института» при Пермском государственном национальном исследовательском университете пройдено 360 горных выработок, из которых 97 шурфов, 262 скважины и одна дудка. В границах участка трассы магистрального газопровода в Ординском районе по данным архивных материалов ОАО «ВерхнеКамТИСИз», ОАО «Пермгипроводхоз», ФГБОУВПО «ПГНИУ» пройдено 742 горные выработки, из которых 47 шурфов, 675 скважин (в том числе 14 кустовых) и 6 дудок. В пределах пос. Октябрьский по данным архивных материалов ОАО «ВерхнеКамТИСИз» пройдено 515 горных выработок, из которых 70 шурфов, 438 скважин и 7 шурфов-скважин.

Плотность и равномерность изученности исследуемых территорий буровыми работами различная. Наиболее полные в площадном отношении данные собраны для территорий г. Кунгур и участка трассы газопровода в Ординском районе. В пределах Полазненского полуострова изученность массива буровыми работами характеризуется фрагментарностью и неравномерностью. В пос. Октябрьский наиболее полно геолого-гидрогеологические и инженерно-геологические условия исследованы в пределах правобережной части р. Чад (рисунок 2.6).

Согласно схеме карстологического районирования Пермского края [42] исследуемые территории приурочены к 4 карстовым районам: пгт Полазна – Полазненскому, г. Кунгур – Нижнесылвенскому, Ординский район – Иренскому и пос. Октябрьский – к району Уфимского плато (рисунок 2.7, А). В пределах первых трех районов преобладает сульфатный и сульфатно-карбонатный тип карста. В пос. Октябрьский карст приурочен к толще карбонатных отложений. Основными карстующимися породами являются гипсоангидриты, известняки и доломиты (рисунок 2.7, Б).

Благодаря наличию карстующихся пород в пределах исследуемых территорий весьма интенсивно развиты карстовые явления. Рельеф осложнен большим количеством карстовых форм, как поверхностных, так и подземных. Созданию современных форм рельефа способствовали крупные региональные разломы и разломы палеоген-неогенового возраста. Схематическое распространение исследуемых карстовых форм в пределах рассматриваемых территорий приведено на рисунке 2.8.

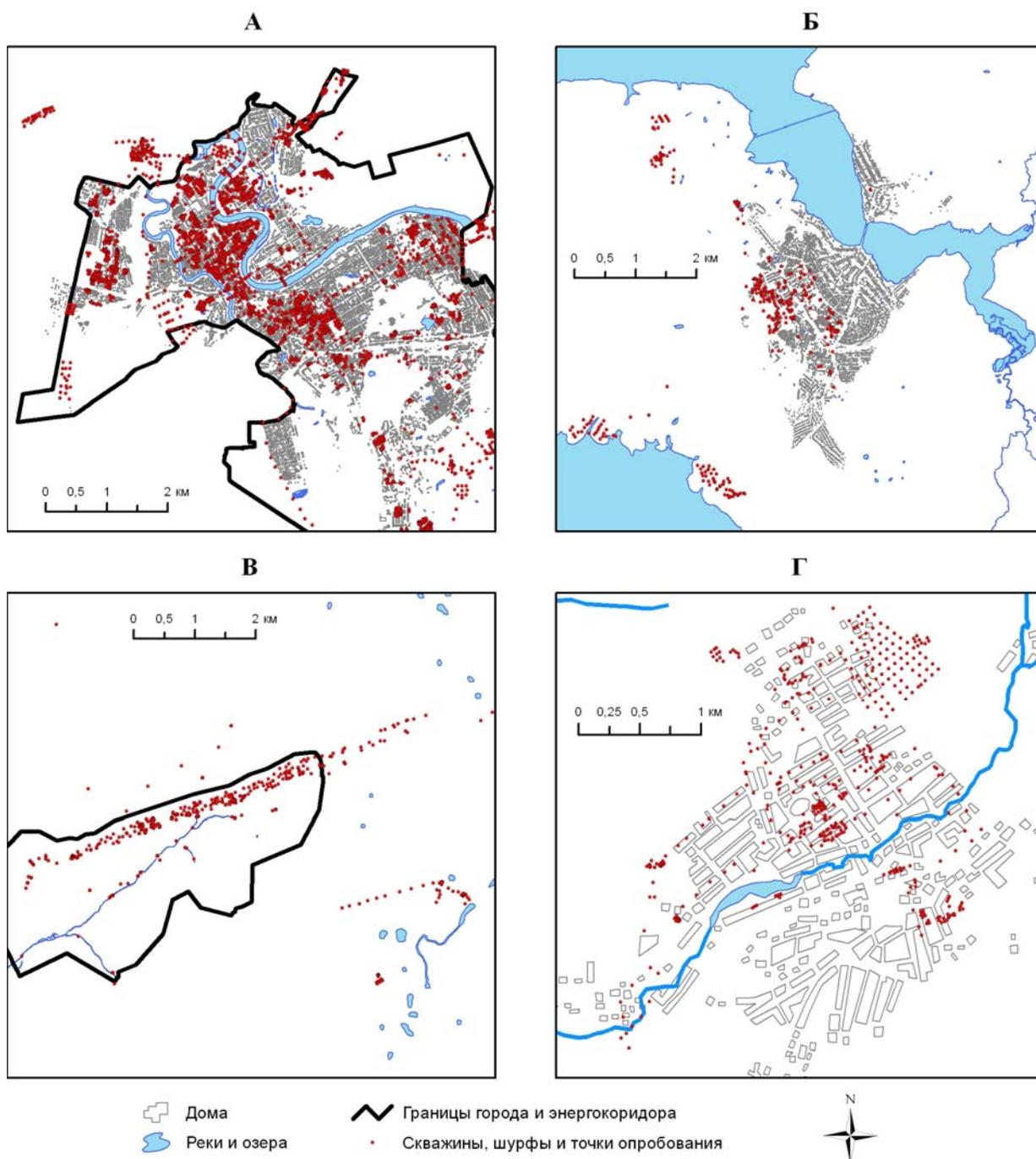


Рисунок 2.6. Схема изученности исследуемых территорий буровыми работами и опробованиями: А – г. Кунгур, Б – пгт Полазна, В – Ординский район, Г – пос. Октябрьский

На территории г. Кунгур поверхностные карстопроявления представлены современными и древними провальными воронками, реже – локальными понижениями. В период с 1956 по 2006 гг. на территории г. Кунгур сотрудниками лаборатории-стационара УрО РАН задокументированы и детально описаны 393 случая образования провалов и локальных оседаний. Дополнительно в результате анализа топоплана (генплана) города масштаба 1:5000, дешифрирования аэрофотоснимков и полевых карстологических обследований было закартировано с точной координатной привязкой и достаточно подробно описано 408 древних провальных карстовых воронок, локализованных главным образом в пределах высоких террас

рр. Сылва, Ирень и Шаква. В результате анализа буровых колонок скважин, пробуренных на территории города, было выделено 509 карстовых полостей и 386 зон дробления, вскрытых, соответственно 311 и 294 скважинами. 139 полостей являются открытыми. Большинство полостей и зон дробления (506 и 366 шт. соответственно) образовано в сульфатно-карбонатных породах иренского горизонта. На филипповские карбонаты приходится лишь 3 полости и 22 зоны дробления.

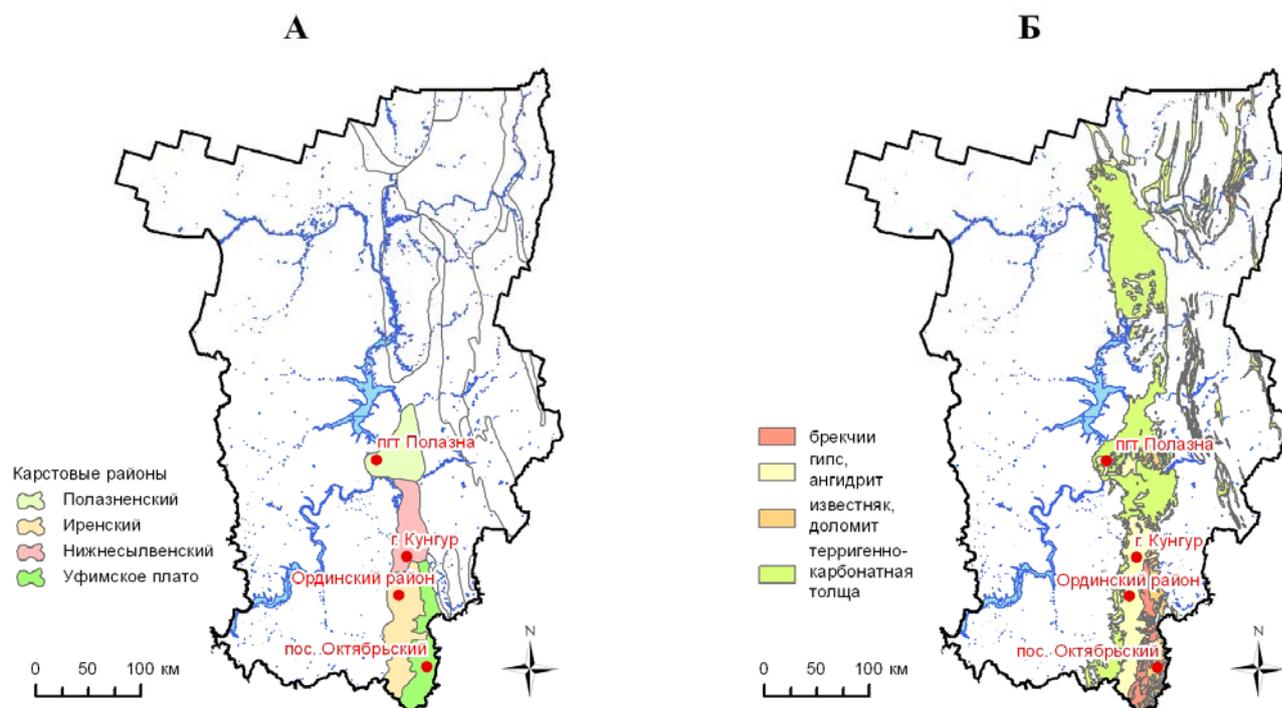


Рисунок 2.7. Приуроченность исследуемых территорий к карстовым районам (А) и основные карстующие породы, развитые в их пределах (Б) (схемы составлены по материалам [42])

По материалам архивных изысканий ОАО «ВерхнеКамТИСИЗ» и ОАО «Пермгипроводхоз» на территории Полазненского п-ова было закартировано с точной координатной привязкой и достаточно подробно описано 536 карстово-суффозионных воронок из них 97 шт. приходится на пгт Полазна, 324 шт. локализованы в д. Демидково и 115 шт. – в д. Боброво. От всего числа скважин, пробуренных на территории пгт Полазна и прилегающих участков, 60 из них вскрыли 146 карстовых полостей, причем 139 из них вскрыто в пределах пгт Полазна и лишь 7 полостей приходится на территорию д. Демидково. 66 полостей являются незаполненными. В результате проведенного анализа на изучаемой территории было выделено 82 зоны дробления, локализованных в 52 скважинах. Наиболее часто полости и зоны дробления встречаются в гипсах и ангидритах, доломитах. Вторичное значение в формировании зон дробления имеют известняки, прослои, примазки и включения мергеля, алевролита и аргиллита в толще иренских отложений.

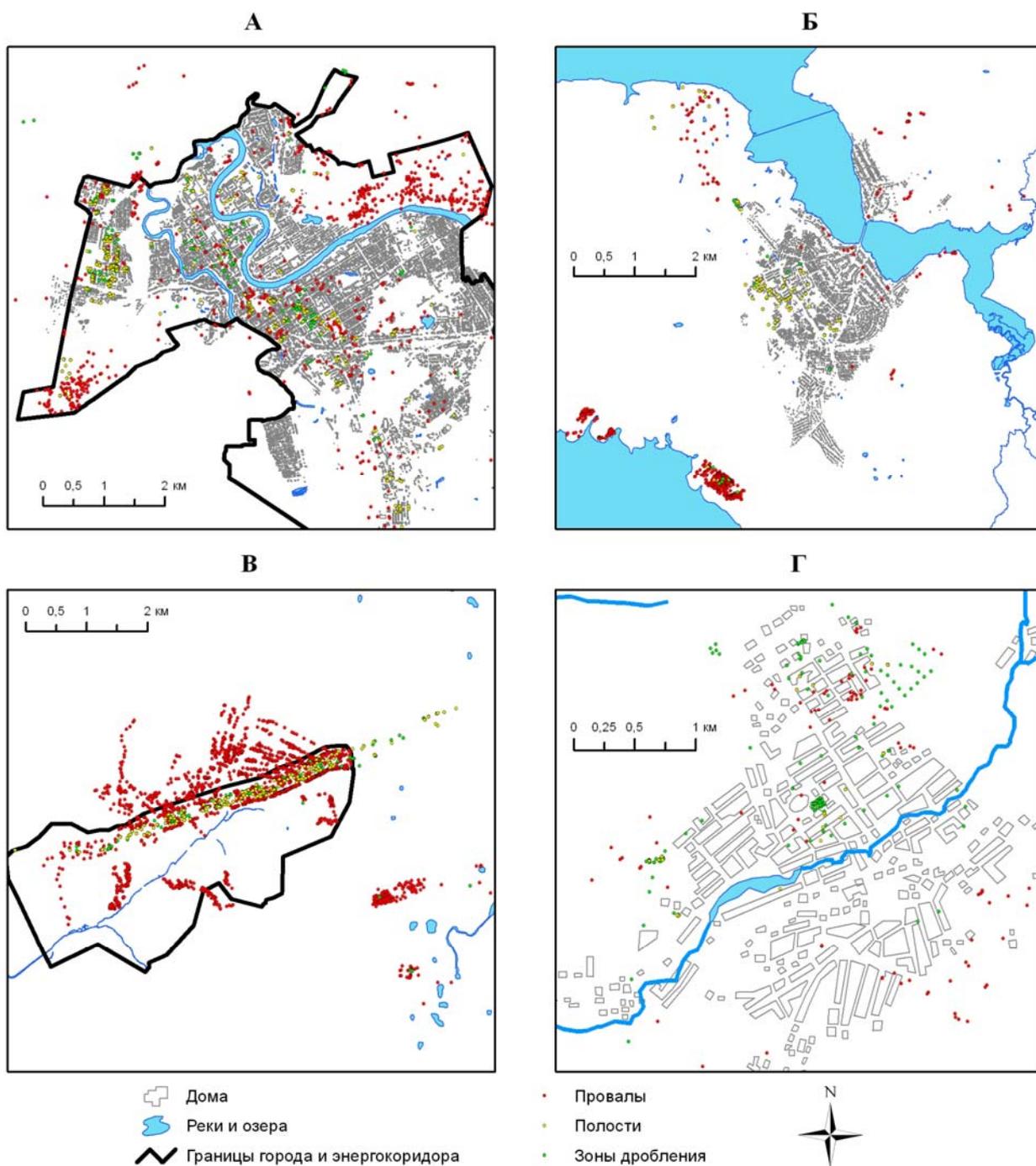


Рисунок 2.8. Схема распространения карстовых форм в пределах исследуемых территорий: А – г. Кунгур, Б – пгт Полазна, В – Ординский район, Г – пос. Октябрьский

Поверхностные и подземные карстовые формы в пределах участка трассы газопровода «Ямбург-Елец» в Ординском районе закартированы по данным отчетных материалов инженерных изысканий, научно-исследовательских и производственных работ, проведенных такими организациями, как ОАО «ВерхнеКамТИСИз», ОАО «Пермгипроводхоз», ФГБОУВПО «ПГНИУ», а также с использованием различных картографических материалов и космоснимков. Весомая часть карстовых воронок была дешифрирована с крупномасштабных и детальных космоснимков Google, Bing Maps и Bird's Eye. Всего в границах исследуемого участка трассы

закартировано порядка 2657 карстовых воронок. Большая часть из них (1906) имеет атрибутивную информацию об их форме в плане и разрезе и морфометрических параметрах на момент съемки. Из подземных карстовых форм в результате обработки буровых данных были выделены 352 карстовые полости и 408 зон дробления коренных карстующихся пород, локализованные, соответственно в 181 и 222 скважинах. 158 полостей являются незаполненными.

По данным архивных материалов треста ОАО «ВерхнеКамТИСИЗ» за последние 60 лет на территории пос. Октябрьский было зафиксировано и описано 89 карстовых воронок. Большая часть из описанных воронок образовалась более 60-80 лет назад и к настоящему времени уже не выделяется в рельефе местности ввиду техногенного вмешательства и интенсивной застройки территории поселка. В результате анализа буровых колонок скважин на территории поселка выделено 40 полостей и 221 зона дробления. Все обнаруженные полости заполнены различными терригенными отложениями. Наиболее часто полости и зоны дробления встречаются в известняках и мергелях, подчиненное значение в этом отношении имеют доломиты. Среди заполнителя карстовых полостей в пределах исследуемых территорий преобладают тонкодисперсные отложения, представленные известковистыми и мергелистыми глинами с дресвой и щебнем коренных пород – известняка, доломита, гипса, ангидрита, мергеля, аргиллита, алевролита. В некоторых случаях полости заполнены крупнообломочным материалом с подчиненным присутствием дисперсных отложений или вовсе их отсутствием.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАРСТООПАСНОСТИ

Проблематика оценки карстовой опасности при освоении закарстованных территорий, несмотря на более чем 50-летний срок изучения данного вопроса до сих пор относится к разряду задач, не получивших окончательного решения. Среди всего многообразия предложенных к настоящему времени подходов к оценке карстоопасности ни один из них не позволяет однозначно достоверно указать место, время и масштабы образующихся карстопроявлений. Сложность изучения и прогнозирования карста можно объяснить трудностью его обнаружения и необходимостью учета большого числа влияющих на него факторов, часто широкой их изменчивостью во времени.

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 сформировать целостное видение рассматриваемой проблемы. Очевидно, что наиболее полными по содержанию являются интегральные методики оценки карстоопасности, направленные на всестороннее изучение карстового процесса в пределах исследуемой части массива.

Чаще всего интегральные оценки выстраиваются по результатам *качественного анализа* различных факторов природного строения и условий развития карста и их комплексирования с некоторыми показателями, характеризующими степень закарстованности территории. Такие оценки характеризуются наибольшей субъективностью, что является их главным недостатком. Несомненным преимуществом качественных оценок является их тесная связь с конкретными изучаемыми объектами. В ряде случаев такие прогнозы вполне удовлетворительно и оперативно без больших затрат могут решать отдельные инженерно-геологические задачи, особенно на ранних стадиях исследований [113]. Например, имея хорошо изученные участки аналоги можно через наиболее легко определяемые показатели закарстованности (плотность, площадной коэффициент и др.) перейти к предварительной оценке степени устойчивости мало исследованных территорий [81].

Согласно действующим строительным нормам [16] районирование закарстованных территорий по качественным признакам (природные условия развития карста) является лишь первым этапом в оценке реальной опасности карста, и принципиально не может быть использовано для обоснования конкретных инженерных решений в области противокарстовой защиты [149]. Окончательные выводы о степени опасности карста производятся в результате анализа распространения поверхностных карстовых форм и прогноза интенсивности их образования и возможных диаметров провалов.

Основными недостатками многих традиционно применяемых методов прогнозного инженерно-геологического районирования, в частности, – посредством анализа факторов по баллам (*полуколичественные методы*), являются неизбежный субъективный подход исследователей при назначении набора факторов, определении их значимости (веса) и ранжировании на классы с различной степенью опасности [113]. Эти недостатки в полной мере свойственны любым качественным и полуколичественным оценкам [26, 49, 138, 189, 190, 210, 212].

Наиболее показательным примером служит широкая по своему содержанию методика оценки устойчивости, разработанная для территории республики Башкортостан и отраженная в региональных нормативах [24]. Она охватывает 32 показателя, с разных сторон характеризующих строение и закарстованность карстового массива. Каждый из показателей в зависимости от его значения и стадии проектирования объектов относится к той или иной категории устойчивости (I-V) или карстоопасности (А, В, С). Однако, несмотря на видимую полноту и целостность данного подхода он имеет ряд существенных недостатков. Так, среди всего множества показателей для оценки устойчивости территорий к карсту реально используемыми оказываются не более 10. Остальные из них, либо трудно установимы в процессе исследований, либо косвенно характеризуют состояние карстового массива, т.е. не являются факторами, напрямую обуславливающими характер его развития. Половина показателей оценивается качественно, половина – количественно, что вводит дополнительную путаницу при достоверной интерпретации действительной картины. Наконец, балльный принцип интегральной оценки всех анализируемых показателей не позволяет целостно и однозначно определить верную категорию устойчивости. Но, несмотря на все выше сказанное, данная методика инженерной оценки карста является в настоящее время одной из лучших в России. Она позволяет наиболее полно оценивать степень закарстованности и на основании интегрального анализа определять устойчивость массива в целом.

Согласно В.В. Толмачеву и др. [149] отказываться от применения качественных и полуколичественных методов оценки карстоопасности в настоящее время было бы принципиально неверно, так как многие аспекты оценки карстовой опасности пока не имеют решений на количественном уровне. Тем не менее, инженерная практика освоения закарстованных территорий требует неуклонного учета этих аспектов. Качественные методы предполагают (естественно, в пределах своих возможностей) учет различных дополнительных обстоятельств и региональных особенностей. Именно через качественные методы оценки карстоопасности практика выдвигает перед исследователями и инженерами необходимость решения задач ее количественного прогноза.

В настоящее время в инженерной геологии прогрессивной тенденцией является разработка и составление *количественных методов* прогноза опасных геологических процессов [113]. Количественные прогнозы строятся в зависимости от принятой математической модели развития процесса, которые разделяются на две разновидности: *детерминированные* и *вероятностно-стохастические*. В последнее время наметилась тенденция к созданию гибридных прогнозных математических моделей, сочетающих в себе детерминистический и вероятностный характер (*вероятностно-детерминированные*).

Началом применения детерминистических количественных методов к прогнозной оценке карстообразования следует считать конец 1940-х годов. В это время впервые начали разрабатываться схемы прогнозных оценок образования единичных провалов, получившие в дальнейшем распространение и развитие в работах многих отечественных и зарубежных карстоведов. Среди них особенно выделяются комплексные исследования, проведенные В.П. Хоменко [159-161] и В.М. Кутеповым [86].

В.П. Хоменко на основании большого объема работ по моделированию механизма образования поверхностных карстово-суффозионных проявлений вывел формулы разрушения локальных водоупоров под действием гидростатических сил и фильтрационного разрушения водонасыщенных песков для безнапорных и напорных условий. Как отмечают Н.А. Блоцкий и Н.Н. Ковшиков [5], применение данных формул на практике дало удовлетворительную сходимость с результатами натурных наблюдений.

В работе В.М. Кутепова [86] предлагаются расчетные методы оценки устойчивости закарстованных территорий, основанные на изучении закономерностей изменения напряженного состояния горных пород под воздействием гидродинамического фактора. Ценность этого исследования состоит в том, что автор вывел серию уравнений для решения различных многомерных задач по прогнозу карстового провала на поверхности, которая учитывает различную литологию, физико-механические свойства и мощность подстилающих отложений, уровни подземных вод и фильтрационную характеристику водоносных горизонтов.

Н.А. Блоцкий и Н.Н. Ковшикова [5] справедливо замечают, что детерминистические методы хороши тем, что основываются на прямых данных бурения и скважинной геофизики с использованием теоретических математических решений и схем. Однако при этом у данного подхода имеется существенный недостаток, который заключается в невозможности учета площадного развития процесса и его динамики. Он ориентирован на точечную оценку, осуществляемую в отрыве от основных природных условий территории исследования (структурно-тектонических, геоморфологических, гидрологических, гидрогеологических и т.д.), оказывающих определенное воздействие на активизацию и развитие карста.

Несмотря на широкое использование в инженерно-геологической практике детерминированных моделей при оценке воздействия и прогноза опасных природных процессов более перспективным и эффективным решением является использование вероятностного подхода. Такие модели позволяют наиболее полно учитывать сложные и нелинейные связи, наблюдаемые внутри природных систем.

В результате углубленного изучения процесса провалообразования в 70-80-е гг. XX столетия как отечественными, так и зарубежными исследователями был сделан вывод, что этот процесс носит стохастический характер и его надлежит рассматривать в вероятностном аспекте. В настоящее время в практике инженерного карстоведения именно вероятностно-статистические модели являются основными при осуществлении площадных карстологических прогнозов развития карстовых форм. Данное направление исследований получило широкое распространение не только в плане появления все новых теоретических разработок по оценке карста и связанных с его проявлениями опасностей, но и в практике инженерно-геологических изысканий в карстовых районах.

Отмечающаяся в геологических науках и в инженерном карстоведении в частности тенденция, свидетельствует о том, что применение количественных оценок, основанных на методах теории вероятности, а также все новых и модернизирующихся алгоритмах математической статистики в скором будущем станет основным способом интерпретации данных в процессе изучения карстовых массивов, заменив традиционные описательные (качественные) характеристики объектов.

В процессе интегральных построений математической статистической обработке подвергаются как сами карстопроявления, так и комплекс факторов, определяющих природные условия развития карстового процесса. В ходе анализа с применением различных статистических процедур (расчет коэффициентов связи, энтропия и методы теории информации, регрессионные зависимости и пр.) количественно оценивается влияние природных факторов на интенсивность образования карстовых форм в результате установления [149]:

- 1) наличия связи между данным фактором и происхождением карстовой формы;
- 2) характера и силы этой связи;
- 3) степени значимости каждого из рассматриваемых факторов.

Всю совокупность предложенных ранее количественных методов интегральной оценки карстоопасности в зависимости от их теоретической подосновы можно разделить на две группы. К первой группе относятся методические подходы, направленные на изучение характера распределения карстовых форм в пространстве и времени [146, 149] или их распределения по значениям исследуемых факторов природного строения [5, 149, 184, 240, 242]. Результатом таких оценок, как правило, являются некоторые вероятностные или количественные показатели,

характеризующие интенсивность проявления карстовых форм при определенных значениях природных факторов. Вторая группа включает совокупность количественных оценок карстоопасности, осуществляемых методами множественного корреляционно-регрессионного анализа [111, 220, 221]. Такие оценки обычно сводятся к построению прогнозного уравнения, устанавливающего взаимосвязь между отдельным набором показателей природных условий и каким-либо показателем закарстованности. Значительно реже результатом множественной корреляции является некоторая прогнозная вероятностная оценка (логистическая регрессия).

В инженерно-геологической литературе известны количественные интегральные методики оценки проявления различных опасных экзогенных процессов, которые при определенных условиях и с некоторыми ограничениями могут быть применены к исследованию карста. Наиболее распространенные из них (метод геодинамического потенциала К.А. Гулакяна [43, 44], модель вероятностного подхода Г.Л. Круковского [85], метод оценочных функций и др.) приведены в сводном монографическом издании «Опасные экзогенные процессы» [113]. Интегральный статистический показатель инженерно-геологических условий был предложен В.В. Пендиным [115], применение которого позволяет решать широкий круг задач, в том числе связанных с оценкой опасности проявления карста. Заметим, что практически все количественные интегральные методики укладываются в рамки двух выделенных выше групп.

Применение методов математического моделирования позволяет более объективно подходить к прогнозированию карстоопасности. Однако практически всем им свойствен широкий круг ограничений. Наиболее значимое из них заключается в необходимости выделения площадей условно однородных по значениям факторов, существенно влияющим на принятые для оценки карстоопасности параметры в рассматриваемом регионе. В наибольшей степени данное обстоятельство сказывается на качестве моделей, построенных по результатам множественного корреляционно-регрессионного анализа и его различных разновидностей.

Согласно В.В. Толмачеву и др. [149] точность результирующих интегральных построений с применением вероятностно-статистических методов зависит от степени соблюдения следующих допущений:

1. Анализируемые провалы однотипны по механизму образования.
2. Условия сохранности карстовых провалов на рассматриваемой территории примерно одинаковы. В противном случае целесообразно предварительно районировать эту территорию.
3. Внешние природные условия практически не изменяются за время, соизмеримое со средним сроком сохранности на земной поверхности карстовых провалов.
4. Число карстовых провалов, на образование которых оказали влияние техногенные факторы, по отношению к общему числу провалов на данной территории несравнимо мало.

5. Исследуемые природные факторы мало связаны с эволюционным характером карстового процесса.

Многим количественным интегральным подходам к оценке карстоопасности свойственны некоторые недостатки, характерные для качественных и полуколичественных методик. Например, это относится к субъективности имеющей место при формировании набора оцениваемых показателей природных условий. Среди характерных недостатков существующих интегральных количественных подходов к оценке карстоопасности можно выделить:

1. Широкий круг ограничений в отношении применимости ряда статистических анализов. Например, регрессионные модели не позволяют оперировать всеми исследуемыми показателями природного строения. Наиболее точные модели строятся по ограниченному их числу. Расчет корреляционно-регрессионных моделей требует соблюдения условия о независимости исследуемых показателей природного строения, что практически невыполнимо при исследовании карстовых массивов.

2. Отсутствие бесконечно большой базы входных данных для построения модели, максимально учитывающей влияние всех рассматриваемых показателей природных условий.

3. Ориентацию применяемого вероятностно-статистического аппарата на прогноз площадной вероятности образования новых карстовых форм в зависимости от значений факторов природных условий. Решение второй важной задачи оценки карстоопасности – определение морфометрических параметров карстопроявлений часто уходит на второй план и вовсе упускается из внимания.

4. Применение неоднозначных итоговых интегральных показателей карстоопасности, часто имеющих неопределенные единицы измерения, значения которых изменяются в различных пределах в зависимости от территории исследования.

5. Излишнюю трудоемкость процедуры расчета вероятностно-статистических интегральных показателей карстоопасности.

Таким образом, существующие на данный момент интегральные подходы к оценке карстоопасности (как качественные, так и количественные) обладают общими недостатками, характер которых изменяется в зависимости от каждой конкретной методики. Наиболее значимыми недостатками, по-нашему мнению, являются:

1. Акцентирование внимания на рассмотрении поверхностных форм карста. При этом анализу подземной закарстованности, как правило, уделяется второстепенная роль.

2. Субъективное выделение комплекса исследуемых факторов развития карста, зачастую не в полной мере отвечающих природе карстового процесса. Совместное рассмотрение как качественных, так и количественных показателей.

3. Высокая субъективность при осуществлении качественных оценок (в том числе с применением нормативного подхода) и, как следствие, зависимость конечного результата от видения эксперта, осуществляющего оценку.

4. Субъективное выделение интервалов значений количественных и категорий качественных показателей природных условий, характеризующихся различной степенью опасности. Данное обстоятельство присуще оценкам, осуществляемым балльным методом, а в некоторых случаях может быть характерно в процессе статистического анализа распределения карстовых форм по показателям природного строения.

5. Широкий круг ограничений, свойственный вероятностно-статистическим количественным методам оценки. Ограничения в первую очередь связаны с особенностями применяемых статистических процедур (факторный анализ, множественная корреляция, дисперсионный анализ и пр.).

6. Не всегда обоснованное назначение весовых коэффициентов, учитывающих вклад отдельных факторов в общую интегральную модель. В случае балльной оценки веса назначаются, как правило, экспертным способом, в случае количественного подхода – с применением сложных статистических анализов (множественных корреляционно-регрессионных моделей), имеющих определенные ограничения, рассмотренные выше.

7. Неоднозначность трактовки итоговых балльных и количественных вероятностно-статистических интегральных показателей в отношении опасности проявления карста. Форма представления интегральных показателей, их размерность и принципы выделения интервалов значений с различной степенью опасности зачастую не имеют строгого обоснования.

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 методов применительно к условиям конкретной исследуемой территории.

11. Невысокая прогностическая способность, в особой степени свойственная полуколичественным и количественным методам оценки.

Сформулированные недостатки позволяют сделать заключение о том, 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. Рассматривая актуальные задачи инженерного карстоведения В.В. Толмачев и Ф. Ройтер [151] указывают на необходимость дальнейшего бесконечного

совершенствования методов количественного прогноза параметров карстового процесса, развитие методических подходов к оценке карстоопасности по ряду косвенных признаков в условиях недостаточности прямой объективной информации о карстовых деформациях и с учетом характера инженерной задачи. Наличие характерных недостатков существующих подходов, в том числе и нормативно закреплённой методики отмечает В.П. Хоменко [162], заключая о необходимости разрешения этой проблемы и совершенствования существующих алгоритмов оценки.

Одной из первоочередных задач инженерного карстоведения в наши дни является углубление исследований, направленных на дальнейшую разработку и совершенствование методов инженерно-геологической оценки карста с позиции интегрального количественного подхода. Всесторонний анализ карстовых массивов с позиции отдельных его составляющих элементов и их совместного пространственно-временного взаимодействия – цель настоящих и будущих карстологических исследований. Похожую мысль высказывал И.В. Попов [123], определяя круг проблем, стоящих перед исследователями в области инженерного карстоведения. Он указывал, что один из возможных путей решения состоит в определении размеров, времени возникновения и скорости развития карста, которое должно основываться на тщательном изучении и оценке относительной роли каждого из факторов карстообразования на каждом участке изучаемой местности. Создание наиболее полной модели карстового массива, отражающей особенности его природного строения и характер закарстованности, при помощи ввода в анализ многочисленных показателей и их комплексной обработки и учета должно явиться конечным результатом обобщений в инженерном карстоведении. Построение такой модели должно быть основано на количественных (математических) методах оценки с позиций системного анализа и синергетического подхода к изучению карстовых массивов [253].

Согласно В.В. Толмачеву и Ф. Ройтеру [151] исследования в области инженерного карстоведения нельзя считать законченными, если они не доведены до конкретных расчетных схем, используемых в практике изысканий и проектирования. Это требует их формализации и упрощения и ведет к необходимости замены более сложных закономерностей более простыми. В то же время, при всей простоте расчетов они должны максимально учитывать всю сложность системы «карст – сооружение», ее отдельных подсистем, элементов и их взаимосвязей, основываясь при этом на достаточно сложных математических методах и понятиях. Поиск наиболее универсальных решений применительно к оценке карстоопасности и устойчивости территорий продолжается и в настоящее время.

Математическая модель развития карстового массива должна выстраиваться таким образом, чтобы с ее помощью исследователь мог максимально точно, эффективно и быстро установить вероятность формирования карстопроявлений и приближенно оценить

морфометрические параметры как поверхностных, так и подземных карстовых форм, опираясь лишь на данные о природном строении массива. Очевидно, что построение такой модели невозможно без привлечения новых данных, расширения и систематизация сведений о природных условиях и закарстованности различных территориальных единиц. Согласно J.P. Galve et al. [219-221] привлечение сведений по различным карстовым участкам, расширение географии исследования позволит установить и сформировать более устойчивые и точные интегральные модели карстоопасности. Немаловажным условием является применение более рациональных и комплексных методов математической статистики и теории вероятностей.

Одним из ключевых требований к будущим интегральным разработкам является повышение их универсальности, т.е. применимости в любых карстогенетических обстановках. К настоящему времени, несмотря на мощную базу методов инженерной оценки закарстованных территорий, в полной мере универсальными являются только нормативно закрепленные оценки, осуществление которых производится в результате районирования закарстованных территорий по характеру природных условий развития карста и показателям поверхностной закарстованности, т.е. фактически осуществляется на качественном, экспертном уровне. Предложенные количественные интегральные подходы по-прежнему не имеют универсальных решений.

По нашему мнению, современная методология оценки опасности проявления карста при инженерно-хозяйственном освоении закарстованных территорий должна соответствовать следующим принципам:

- 1) учитывать основные условия развития карстового процесса, выраженные через набор природообразующих показателей-факторов;
- 2) характеризоваться относительной простотой установления показателей природных условий, их инженерно-геологической направленностью и широкой применимостью в повседневной изыскательской практике;
- 3) базироваться 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) обладать универсальностью в отношении однозначности трактовки получаемых результатов независимо от территории и объекта исследования.

3.1. Обоснование оптимального набора оценочных показателей природного строения

Существование и направленность развития карстового массива проявляется через всевозможные факторы, характеризующие активность протекания карстового процесса. Под ними понимаются причины, обусловленные свойством явления или взаимодействия, которые не определяют его существования, но влияют на ход процесса и его интенсивность [53]. Часто в качестве синонимов термина «фактор» используются такие понятия как показатель, параметр, признак, компонент, элемент, агент [145]. В настоящей работе в качестве основного синонима широко используется термин «показатель».

В инженерном карстоведении понятие «фактор» используется очень широко, но трактуется по-разному. В результате анализа, проведенного авторами учебного пособия «Инженерное карстоведение» [63], было установлено, что факторы развития карста в имплицитной форме используются практически всеми исследователями. В особо явной форме показатели природных условий развития карста используются при районировании закарстованных территорий с применением различных интегральных подходов.

Набор факторов, учитываемых при оценке карстоопасности территорий, зависит от характера решаемой задачи, масштаба исследований и особенностей механизма и динамики развития карста, а также от качества и объема имеющейся в распоряжении исследователя информации.

В.Н. Дублянский, Г.Н. Дублянская и др. говорят о необходимости выделения *ведущих* и *второстепенных* факторов. К ведущим относятся факторы, которые вносят основной вклад в развитие карста, в то время как второстепенные факторы характеризуются незначительным влиянием на его активность [63]. Например, М.Д. Сычева [144] в качестве основных ведущих факторов рассматривает трещиноватость, характер перекрывающих пород, их мощность и состав, гидрогеологические условия и химический состав подземных вод.

К числу ведущих факторов следует относить в первую очередь те из них, которые в максимальной степени соответствуют основным условиям развития карста, т.е. отражают природные особенности строения карстовых массивов. Заметим, что некоторые авторы к ведущим относят техногенные факторы, что по своей сути является не совсем верным. Как отмечает С.Н. Edmonds [210] техногенная нагрузка является возбудителем карстообразования, в то время как его природа, глубинная суть процесса априори не зависит от деятельности человека. Характер техногенного воздействия неизбежно находит свое отражение во внутренних условиях существования карстового массива, влияя на процессы, происходящие в нем.

Прогностическая способность результирующих моделей во многом зависит от разнообразия применяемых в процессе оценки показателей, характеризующих карстовый

процесс с различных сторон [3]. При этом не следует отождествлять разнообразие показателей с их количеством. В.Н. Дублянский и Г.Н. Дублянская [53] указывают на недостаток таких методик, которым присущ охват как можно большего числа показателей. Например, при рассмотрении только фактора геологического строения территории можно выделить порядка 5-10 показателей, в полной мере характеризующих и описывающих карстовый массив [69]. В некоторых случаях исследователи карста выделяют до 100 и более показателей [5, 24] факторов, что не только усложняет процедуру оценки, но и не является гарантом ее качества.

Согласно В.В. Толмачеву и др. [149] немаловажную роль играет тщательность изучения и оценка относительной роли каждого из факторов карстообразования на каждом участке изучаемой местности.

Насущным вопросом является проблема унификации показателей активности карстового и сопутствующих процессов [108]. Необходимость универсализации набора показателей продиктована общностью условий развития карста в различных природных обстановках. Исследуемые факторы должны быть максимально применимыми в любых природных условиях. В.Н. Катаев [69] отмечает, что процесс поиска универсального набора показателей карстообразования не закончен, а вследствие этого в области теории карстоведения задача построения различных классификаций карстогенетических факторов, анализа их теоретической и практической значимости остается актуальной.

Еще одним важным критерием является уровень сложности установления рассматриваемых факторов. Согласно В.Н. Дублянскому и Г.Н. Дублянской [53] они должны достаточно легко определяться по топографическим, геологическим или иным картам или выводиться на основании имеющихся данных (полевые замеры, лабораторные анализы и пр.).

Исследуемые факторы часто характеризуются не только количественной, но и качественной информацией, к которой относятся данные о литологическом составе стратиграфо-генетических комплексов пород, о типах морфоструктурных образований и т.п. [113]. Наиболее объективные оценки достижимы при использовании показателей, выражаемых количественным или полуколичественным способом.

При рассмотрении показателей природного строения закарстованных территорий многими исследователями производится их *группирование*, осуществляемое по различным критериям. Например, в ТСН [24] вся совокупность факторов группируется в зависимости от стадийности изысканий, в результате чего выделяется 3 группы факторов, рассматриваемых отдельно на стадиях предпроектной, проектной и рабочей документации.

Как отмечают В.Н. Дублянский и Г.Н. Дублянская [53] основным недостатком использования подходов, направленных на анализ факторов природного строения, является их слабая увязанность с условиями развития карста, сформулированными Д.С. Соколовым [137]. В

связи с этим они предлагают все анализируемые показатели относить к четырем группам, соответствующим 4 условиям развития карста. Отталкиваясь от этих условий Г.Н. Дублянкой и В.Н. Дублянским [49, 50] неоднократно предлагался набор показателей для оценки карстологических условий массива, впоследствии унифицированный ими с целью применения в любых карстологических обстановках (таблица 3.1). Как отмечают авторы, предложенный ими набор показателей универсален, он применим для любого типа карста, на разных масштабных уровнях исследования. Сами показатели легко определяются по различного рода картам и в полевых условиях, они хорошо выражаются в количественной форме, что удобно при их математической обработке.

Таблица 3.1. Показатели развития карста [53]

<p style="text-align: center;">1-е условие (наличие растворимых горных пород)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Развитие карстующихся пород в плане 2. Развитие карстующихся пород в разрезе 3. Литология карстующихся пород 4. Мощность карстующихся пород 5. Характер перекрывающих отложений 6. Мощность перекрывающих отложений 	<p style="text-align: center;">3-е условие (наличие движущихся вод)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Эффективные осадки 2. Конденсация 3. Поверхностный сток 4. Подземный сток 5. Уклон подземного потока
<p style="text-align: center;">2-е условие (наличие водопроницаемости пород)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Структурно-тектонические условия 2. Залегание пород 3. Тектонические нарушения и трещиноватость 4. Водопроницаемость карстующихся пород 5. Водопроницаемость перекрывающих пород 6. Неотектонический режим 	<p style="text-align: center;">4-е условие (наличие растворяющей способности воды)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Температура воды 2. Минерализация и ионный состав воды 3. pH воды 4. Повышение агрессивности воды

Чаще всего группирование показателей развития карста производят в зависимости от их генетической приуроченности. Наиболее простое деление подразумевает отнесение всей совокупности исследуемых факторов к двум группам в зависимости от глобальной причины активизации карста: природной и техногенной. Самым же распространенным способом группирования является выделение факторов в зависимости от различных аспектов природных условий, которые они характеризуют. При этом выделяются группы геологических, гидрогеологических, биологических и др. показателей [5, 68, 202, 210, 219-221, 224, 241]. Например, В.И. Мартин [108] делит всю совокупность факторов, влияющих на активность карста на три группы:

1) геолого-гидрогеологические (состав, состояние и свойства карстующихся и перекрывающих пород, тектоника, неотектоника; динамика, химический состав и агрессивность подземных вод);

2) физико-географические (климат, рельеф, палеорельеф, гидрологический режим, химический состав и агрессивность поверхностных вод, атмосферные осадки, почвы, растительность и т.д.);

3) антропогенно-техногенные (утечки из водонесущих коммуникаций, нарушение поверхностного и подземного стока, разработка месторождений полезных ископаемых и т.д.).

Унифицированный набор факторов при изучении карстовых массивов на различных масштабных уровнях был предложен В.Н. Катаевым [68]. Например, всю совокупность показателей на локально-блоковом уровне организации он относит к геоструктурной, литологической, геоморфологической и гидродинамической группам. К сожалению, в своей работе В.Н. Катаев рассматривает показатели, выраженные только в качественной форме, а, следовательно, трудно поддающиеся математической обработке.

Генетический подход к ранжированию отдельных показателей карстообразования на группы, по нашему мнению, является наиболее общим и целостным, ввиду ряда причин. Такой принцип группирования характерен и встречается во многих смежных дисциплинах геологического цикла [143], а также в ряде других естественных наук. Отсутствие ограничения при выделении групп, характерного для четырех условий развития карста, позволяет рассматривать ряд показателей, связанных с карстообразованием в неявной форме и получать исходя из этого более точные оценки.

Принимая во внимание рассмотренные моменты, используемые показатели природного строения и развития карста, по нашему мнению, должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) легко устанавливаться по материалам инженерных изысканий;
- 2) однозначно трактоваться в независимости от метода или аппаратуры, используемой для их установления;
- 3) носить универсальный характер вне зависимости от территории исследования;
- 4) иметь количественную форму выражения;
- 5) отражать основные условия развития карста (ведущие факторы);
- 6) группироваться в зависимости от особенностей природного строения карстового массива;
- 7) количество показателей не должно превышать 3-5 в рамках отдельно взятой группы, но при этом в совокупности максимально точно отражать характер природных условий, описываемых данной группой;
- 8) объективность оценки не должна существенно снижаться при не включении в анализ ряда показателей, не превышающего 50% от их общего числа, в том числе показателей, составляющих целую группу.

Предлагаемый нами перечень состоит из 17 показателей, разделенных на 5 групп: структурно-тектоническую, геологическую, гидрогеологическую, геоморфологическую и инженерно-геологическую (таблица 3.2). Рассматриваемые показатели в полной мере удовлетворяют приведенным выше условиям. Большинство из них являются широко распространенными в практике карстологических исследований (показатели геологической, гидрогеологической и инженерно-геологической групп). Например, мощности различных литолого-стратиграфических комплексов и уровни подземных вод, а также их гидрохимический состав, выраженный в интегральной форме (минерализация), неоднократно применялись многими исследователями, о чем можно судить из изучения опыта оценки карстоопасности.

Таблица 3.2. Показатели природного строения к интегральной оценке карстоопасности

Структурно-тектонические показатели St :

1. Линейная плотность линеаментов L_l , км/км²
2. Количество пересечений линеаментов M_l , шт./км²
3. Блочность B_l , км²
4. Удаленность от линеаментов R_l , м

Геологические показатели G :

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

Гидрогеологические показатели Hg :

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

Геоморфологические показатели Ge :

1. Уклон рельефа β , °
2. Превышение над средним уровнем рек ΔH , м
3. Удаленность от речной сети U , м
4. Уклон водосбора $\tan \alpha$, д.е.

Инженерно-геологические показатели Eg :

1. Модуль общей деформации грунтов покровной толщи E_0 , МПа
2. Угол внутреннего трения грунтов покровной толщи φ , °
3. Удельное сцепление грунтов покровной толщи c , кПа

Применение механических характеристик грунтов покровной толщи отложений также не является новым. Деформационно-прочностные свойства грунтов являются необходимым атрибутом расчета параметров карстовых провалов с применением детерминистических подходов. Однако случаи вовлечения их в статистическую обработку и оценки на этом основании действительной карстоопасности в инженерной практике единичны [26]. Рассмотрение механических свойств грунтов перекрывающей дисперсной толщи оправдано тем, что они являются основными показателями, характеризующими состояние грунтов и их поведение под действием нагрузок. По основным прочностным и деформационным характеристикам дисперсных грунтов можно косвенно судить об их составе, не прибегая к классификации с использованием качественных описательных характеристик (супесь, песок, суглинок и пр.). Например, с увеличением удельного сцепления увеличивается «глинистость» грунтов, а с ростом значений угла внутреннего трения повышается «песчанистость». Низкие и близкие к нулю значения модуля общей деформации характерны для слабых органи-

минеральных грунтов, в то время как высокие характеризуют пески повышенной крупности [185] (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1. Инженерно-геологические показатели к оценке карстоопасности

Отдельного внимания заслуживают показатели, характеризующие группы структурно-тектонического строения и геоморфологических условий. Использование показателей линеаментной тектоники при изучении структурной трещиноватости массива в последнее время является активно развивающимся направлением геологических исследований. Это продиктовано не только развитием компьютерных технологий и приборной базы, используемой для выполнения отдельных видов изыскательских работ (лазерное сканирование местности, георадарные съемки и т.д.), но и увеличением количества и разнообразия аэрофотоматериалов и космоснимков, находящихся в свободном доступе в сети Интернет. Имеющиеся на рынке специализированные программные продукты позволяют в автоматизированном режиме в сжатые сроки осуществлять анализ фотоматериалов по результатам которого выделяются зоны линейной протяженности, в 80% совпадающие с проявлением глубинной тектоники и направлениями развития трещиноватости массива.

Показатели, характеризующие площадное развитие линеаментов, по своей сути повторяют аналогичные показатели, неоднократно применяемые ранее многими исследователями при площадной оценке развития структурно-тектонической трещиноватости о чем уже говорилось ранее. Рассматриваемые показатели линеаментной тектоники – линейная плотность L_l , количество пересечений M_l , блочность B_l – определяются в площадном отношении, обычно в

результате наложения на линеamentный рисунок квадратной сети наблюдений, по формулам (рисунок 3.2):

$$L_l = \frac{L}{S}, \quad M_l = \frac{M}{S}, \quad B_l = \frac{S_B}{N_B}, \quad (3.1)$$

где L – протяженность линеamentов, км; M – количество пересечений линеamentов, шт.; S – площадь, в пределах которой локализованы линеamentы, км²; S_B – суммарная площадь блоков, сформированных в результате пересечения линеamentов, развитых в пределах исследуемого участка, км²; N_B – количество блоков, развитых в пределах исследуемого участка, шт.

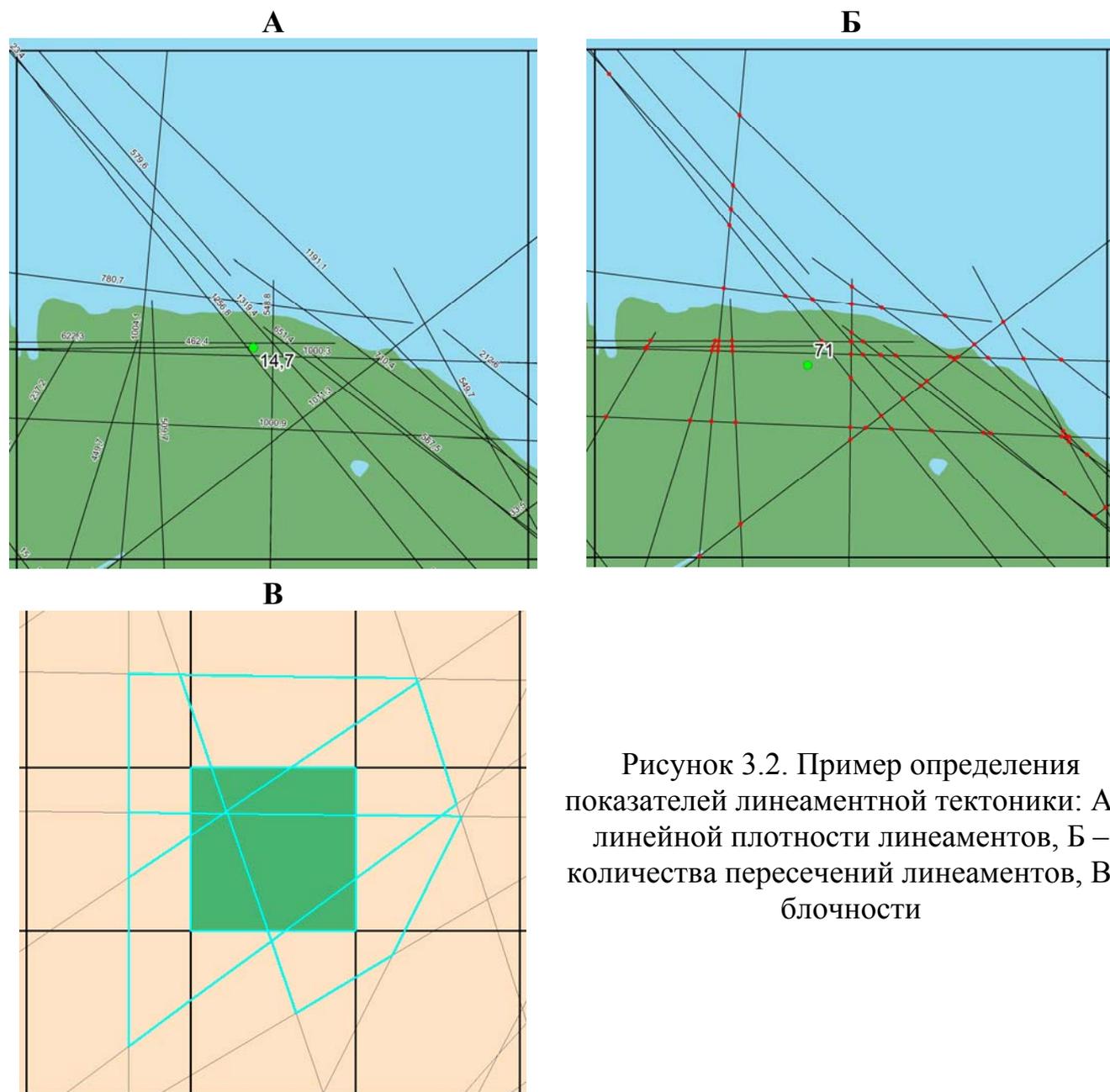


Рисунок 3.2. Пример определения показателей линеamentной тектоники: А – линейной плотности линеamentов, Б – количества пересечений линеamentов, В – блочности

Удаленность от линеamentов R_l , м, устанавливается в результате построения буферных зон, равноудаленных от своей центральной оси, представленной непосредственно линеamentом.

В геоморфологическом отношении показатели, рассматриваемые в рамках одноименной группы, позволяют подчеркнуть горизонтальную и вертикальную зональности в развитии карста, наблюдаемые при удалении от речных долин. Их совместный анализ в количественной форме описывает действующую геоморфологическую обстановку без необходимости учета качественных категорий, часто применяемых при традиционном выделении таких геоморфологических элементов, как области поймы, комплекса речных террас и их уступов, водораздельной области (рисунок 3.3).

В заключение отметим, что предложенный набор показателей не следует однозначно рассматривать как окончательное универсальное решение. Он продиктован, прежде всего, видением авторов проблематики решаемой задачи. При дальнейшем поступлении новой информации и углублении знаний о характере влияния отдельных факторов природных условий на активность развития карста, внедрении новых методов их изучения, перечень показателей также следует перерабатывать и видоизменять. Однако на настоящий момент, по нашему мнению, сформулированные показатели к оценке карстоопасности и их разделение на группы в достаточной степени отвечает условиям, выдвигаемым требованиям практики карстологических исследований.

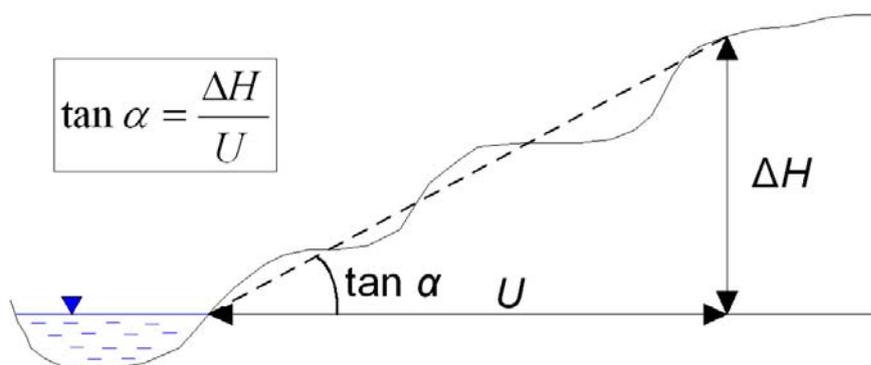


Рисунок 3.3. Показатели геоморфологического строения

3.2. Карстовые формы, рассматриваемые при интегральных построениях

Комплексная оценка карстоопасности по отношению к инженерно-строительным объектам должна базироваться на сопоставлении факторов, характеризующих природные условия развития карста, и проявлений карстового процесса, как на поверхности земли, так и в толще пород с которыми и связаны потенциальные опасности. Несколько подробнее остановимся на рассмотрении терминологического аспекта, возникающая путаница в котором зачастую влечет негативные последствия при истолковании карстологических данных, вследствие чего возможны ошибки при их применении в процессе моделирования карстоопасности.

В карстологической литературе особенности проявления карста в пространстве часто именуют одноименным расхожим термином – «*карстопроявления*». Этот термин широко используется при инженерно-геологических изысканиях, но при этом до сих пор не имеет четкого определения. Например, В.П. Хоменко и В.В. Толмачев [163] под карстопроявлениями понимают состояние геологической среды, выражающееся в изменениях ее структурных особенностей. В.Н. Дублянский и Г.Н. Дублянская [53] понимают под карстопоявлением любое проявление этого процесса на поверхности или под землей. Определение данного термина в нормативной литературе появилось с выходом новых норм регулирования изыскательской и проектной деятельности на закарстованных территориях Нижегородской области [10]. Согласно этому документу, карстопоявления – аномалии в толще горных пород или деформации на поверхности земли, образовавшиеся под действием карстовых или карстово-суффозионных процессов.

Пространственное выражение в массиве и на поверхности карстопоявления находят в виде разнообразных форм. В нормативной литературе приводится следующее определение карстовых форм – карстопоявления, выраженные в пространстве в виде геометрических тел с определенными границами [10, 21-23].

Согласно СП [16] выделяются *поверхностные* и *подземные* карстовые формы. Среди поверхностных карстовых форм различаются воронки, карры, поноры, сложные карстово-эрозионные впадины (овраги, котловины и др.), формирующиеся за счет взаимодействия провалообразования и эрозии, мульды оседания, понижения, вызванные общим оседанием земной поверхности. К подземным карстовым формам относятся расширенные растворением трещины, поры и каверны растворения, разнообразные полости (в том числе, пещеры), разрушенные и разуплотненные зоны, поверхности растворения слоев карстующихся пород, нарушения залегания горных пород в результате их сдвижения и обрушения над карстовыми полостями, разрушенными и разуплотненными зонами.

Таким образом, проявления карста, как на поверхности земли, так и в толще пород крайне разнообразны. По нашему мнению, к наиболее характерным формам поверхностных проявлений карста, вызывающим наибольшие осложнения при хозяйственном освоении территорий, проектировании и строительстве зданий и сооружений, следует относить *карстовые воронки*, а также их выположенные разновидности, выраженные в рельефе поверхности в виде *локальных понижений*. Наиболее опасные в этом отношении формы подземного проявления карста представлены *полостями* и *зонами дробления* (разрушения и разуплотнения коренных пород).

В карстологической литературе приводится множество определений термина «карстовая воронка». Например, согласно В.Н. Дублянскому и Г.Н. Дублянской [53] карстовые воронки – замкнутые, обычно расширяющиеся кверху углубления округлой, овальной или неправильной

формы, диаметром до 100 м, формирующиеся в основном в приповерхностной зоне. Итальянские исследователи определяют карстовые воронки как округлые углубления на поверхности земли [248]. В большинстве территориальных нормативов (как действующих, так и ныне отмененных) под карстовой воронкой понимается локальная карстовая форма на земной поверхности, приближающаяся в вертикальном сечении к усеченному конусу [10, 21, 23]. Генетическое определение данного термина приводится в СП [16], согласно которому карстовые воронки – замкнутые впадины, образующиеся и растущие в результате провалов и локальных оседаний грунта, слагающего земную поверхность.

Наиболее полная генетическая классификация карстовых воронок предложена В.Н. Дублянским и Г.Н. Дублянской [53]. Ими выделены *коррозионные, суффозионно-коррозионные* и *провальные* карстовые воронки. Коррозионные воронки развиваются в открытом карсте достаточно медленно проходя все стадии – от блюдцевидной до конусообразной. Суффозионно-коррозионные воронки (по терминологии СП [16] – карстово-суффозионные) формируются в покрытом карсте при поступлении перекрывающих рыхлых отложений в трещины и полости, развитые в подстилающих карстующихся породах, в результате действия фильтрующегося водного потока. Провальные воронки (по терминологии СП [16] – карстово-обвальные) формируются в покрытом карсте в результате обрушения сводов полостей и поступления в них обвального материала, сложенного карстующимися и некарстующимися перекрывающими отложениями [10, 211, 244, 247]. Выделяется также *смешанный* тип воронок, образованных в результате совместного действия карстово-суффозионного и обвально-карстового механизмов [16, 22, 161].

Наименьшую опасность представляют коррозионные воронки, процесс формирования которых часто происходит на глазах исследователя. Повышенный уровень опасности характерен для суффозионно-коррозионных (карстово-суффозионных) воронок и, наконец, наибольшую опасность для существующих и проектируемых зданий и сооружений представляют провальные (обвально-карстовые) карстовые воронки, образование которых связано с деформированием земной поверхности под действием гравитационных, гидростатических и гидродинамических сил [10, 21-23].

К карстовым деформациям земной поверхности, ведущим к формированию карстовых воронок, в инженерном карстоведении согласно СП [16] относятся *провалы* и *локальные оседания* территории. В карстологической литературе термины «карстовый провал» и «локальное оседание» трактуются по-разному. С одной стороны они рассматриваются как процесс [10, 21-23, 67, 158], а с другой отождествляются с результатом проявления этого процесса. В конечном счете, в результате такого отождествления терминологические пары «провальная карстовая воронка» и «карстовый провал», «локальное оседание» и «локальное

понижение» многими исследователями используются как синонимы [53, 92, 161, 163, 248]. Согласно СП [16] под карстовыми провалами следует понимать катастрофически быстрые обрушения земной поверхности (или основания фундамента) с образованием в ней ямы (воронки). Под локальными оседаниями этим нормативом понимаются постепенные опускания земной поверхности и слагающих ее грунтов, имеющие поперечник (диаметр) не более нескольких десятков метров.

С практической точки зрения в некоторых случаях выделяются своеобразные разновидности карстовых провалов – карстовые просадки – понижения круглой формы глубиной до 0,25 м, возникающие при кратковременных (минуты, дни) обрушениях перекрывающих и карстующихся пород [22, 53, 149].

В зарубежной научно-технической литературе поверхностные карстовые формы именуется терминами «sinkhole» и реже «doline», которые наиболее часто переводятся на русский язык как «карстовая воронка». Их принципиальное отличие заключается в том, что под термином «sinkhole», как правило, понимают карстовые воронки провального генезиса, т.е. образовавшиеся в результате единовременного обрушения пород перекрывающей толщи отложений в подземную полость. Термин «doline», наоборот, часто используется в более широком смысле. Им характеризуются как провальные карстовые воронки, так и те из них, что сформировались в результате медленного оседания земной поверхности (например, как результат суффозии). В ряде случаев под термином «doline» понимаются депрессионные карстовые воронки, сформированные в условиях открытого карста [203, 244, 214]. В США и Великобритании термин «карстовая воронка» часто используется как собирательный для всех поверхностных карстовых форм, независимо от их генезиса [194, 195].

Под карстовой полостью в карстологической литературе понимается свободное или заполненное вторичными (иными) продуктами пространство в карстующейся или вышележащей толще, образовавшееся вследствие растворения горных пород или сопутствующих ему процессов эрозии, обрушения, суффозии [10, 21-23, 149].

Согласно В.В. Толмачеву и др. [149] карстовые полости зачастую ошибочно отождествляются с зонами развития разрушенных и разуплотненных пород, именуемых в настоящей работе зонами дробления. Четкое отличие этих карстовых проявлений от карстовых полостей имеет принципиальное значение при инженерно-геологических изысканиях с точки зрения установления действительной карстоопасности. Как правило, зоны дробления в разрезе скважины характеризуются как ослабленные и им соответствуют участки повышенной трещиноватости горных пород, раздробленность последних до крупно- и мелкообломочных разностей (глыбы, щебень, дресва) или мучинистого (пылеватого) состояния. Такие участки зачастую являются индикаторами развития подземной пустотности, которая в свою очередь

определяет карстовый рельеф поверхности. В связи с этим, рассмотрение зон дробления предоставляет исследователю ценную информацию об активности протекания карстового процесса, а вместе с тем и опасности карста на изучаемой территории [174, 175].

По нашему мнению, интегральная оценка карстоопасности должна выстраиваться с одинаковым учетом как поверхностных, так и подземных карстовых форм. Заметим, что оценка подземной закарстованности в практике проведения изыскательских карстологических работ по-прежнему отодвигается на второй план и зачастую исследуется качественными методами. При разработке методики интегральной оценки карстоопасности 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. Кроме того, в анализе участвуют первичные и повторные провалы. В результате первичных провалов образуются новые карстовые воронки, а повторные провалы вызывают последующее углубление и расширение этих воронок.

Подземные карстовые формы, участвующие в анализе, представлены *карстовыми полостями* и *зонами дробления*, установленными по данным буровых работ.

В качестве исследуемых параметров карстовых форм в процессе настоящих исследований выступают их основные морфометрические характеристики. У поверхностных карстовых форм такими характеристиками являются *диаметры* d [10, 16, 23] и *глубины* z провалов. В качестве диаметров сложных в горизонтальном сечении (плане) карстовых форм рассматриваются их средние величины. Рассматриваемыми морфометрическими параметрами подземных карстовых форм являются *высоты* h_p и/или *мощности* h_z вскрытых бурением карстовых полостей и/или зон дробления.

3.3. Взаимосвязи между морфометрией поверхностных и подземных карстовых форм

Одним из обозначенных выше условий, которому должна удовлетворять разрабатываемая методика интегральной количественной оценки карстоопасности, является ее универсальность, заключающаяся в возможности адаптации методики применительно к любым карстологическим условиям независимо от территории исследования. Успешное разрешение данного условия возможно в результате комплексного анализа природного строения и закарстованности одновременно в пределах как можно большего количества эталонных площадок, локализованных в различных природных обстановках развития карста. Одним из первых шагов в данном направлении может являться изучение карстологических условий и их сопоставление с

показателями природного строения массива в пределах ряда территориальных единиц в рамках отдельно взятого региона. Похожую мысль высказывал В.Н. Андрейчук [27], говоря о том, что выявление региональных и общих закономерностей провального процесса и способов его выражения может быть использовано в качестве вспомогательных, а иногда и основных критериев оценки устойчивости закарстованных территорий.

Анализ мирового опыта оценки карстоопасности показал, что в инженерном карстоведении прогнозная оценка морфометрических параметров карстовых форм, развитых в пределах исследуемой территории, часто сопровождается изучением их эмпирических распределений. Наиболее часто осуществляется построение дифференциальных и интегральных кривых распределения диаметров карстовых провалов, несколько реже – их глубин. В это же время статистические исследования морфометрических характеристик подземных карстопоявлений в мировой карстологической практике ограничиваются единичными примерами.

Принимая это во внимание, в данной работе приводится попытка обобщения обширного фактического материала по морфометрическим характеристикам карстовых форм, закартированных в пределах исследуемых территорий развития сульфатно-карбонатного карста Пермского края. Целью исследования являлось установление статистических закономерностей распределения морфометрических параметров как поверхностных, так и подземных карстовых форм с их последующей генерализацией.

В анализе использованы сведения о параметрах провальных воронок, полученные в результате карстологических съемок, а так же сведения о параметрах карстовых полостей и зон дробления, вскрытых в результате буровых работ. За исходные данные для анализа были взяты основные морфометрические характеристики карстовых форм: *средние диаметры d* и *глубины z* провалов, *высоты h_p* и *мощности h_z* вскрытых бурением полостей и зон дробления. Некоторые основные статистические характеристики исследуемых морфометрических параметров карстовых форм приведены в таблицах 3.3 и 3.4.

В практике карстологического анализа давно доказано, что распределение диаметров карстовых провалов носит логарифмически нормальный характер [40, 83, 146]. При этом в зависимости от возраста образования провалов кривая логнормального распределения постепенно отклоняется в сторону больших значений [56, 83, 151, 268, 269], однако характер этого отклонения в большинстве случаев оказывается незначительным. Отмеченная зависимость довольно хорошо прослеживается на примере исследуемых территорий развития карста. Так, в пределах г. Кунгур и пгт Полазна за последние 50 лет неоднократно фиксировались случаи образования провалов, велось их описание и привязка. На участке газопровода в пределах территории Ординского района мониторинг за образованием новых провальных деформаций ведется Пермским государственным национальным исследовательским университетом и ОАО

«Пермгипроводхоз» лишь с 1998 г. и носит в большей степени инициативный характер. Большая же часть карстовых воронок была закартирована на этой территории в 1980-х – начале 1990-х годов. На территории пос. Октябрьский мониторинг новых провальных деформаций не осуществлялся, хотя и проводились точечные карстологические съемки с фиксацией уже существующих карстовых воронок. По приведенным в таблице 3.3 данным хорошо прослеживается возрастание средних диаметров поверхностных карстовых форм, закартированных в пределах Ординского района и пос. Октябрьский.

Таблица 3.3. Статистическая характеристика средних морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления

Территория исследования*	Количество карстовых форм, шт.	Средний диаметр поверхностных карстовых форм, высота (мощность) подземных форм карста, м		
		min	max	среднее
<i>Карстовые провалы</i>				
г. Кунгур	854	0,1	35,7	8,7
пгт Полазна	535	0,5	100,0	8,8
Ординский район	1906	0,4	85,0	10,3
пос. Октябрьский	89	1,0	90,0	14,4
ОБЩЕЕ	3384	0,1	100,0	10,6
<i>Карстовые полости</i>				
г. Кунгур	509	0,1	17,8	2,2
пгт Полазна	146	0,2	18,0	2,6
Ординский район	352	0,1	9,5	1,4
пос. Октябрьский	40	0,1	9,0	1,2
ОБЩЕЕ	1047	0,1	18,0	1,9
<i>Зоны дробления</i>				
г. Кунгур	386	0,1	13,8	3,4
пгт Полазна	82	0,5	21,0	4,4
Ординский район	408	0,1	28,0	3,4
пос. Октябрьский	221	0,1	31,5	2,9
ОБЩЕЕ	1097	0,1	31,5	3,5

* В строках «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям

Таблица 3.4. Статистическая характеристика карстовых провалов по их глубинам

Территория исследования*	Количество карстовых форм, шт.	Глубина провалов, м		
		min	max	среднее
г. Кунгур	412	0,1	13,0	1,5
пгт Полазна	209	0,2	35,0	3,6
Ординский район	1861	0,1	20,0	2,8
пос. Октябрьский	76	0,2	10,0	2,4
ОБЩЕЕ	2558	0,1	35,0	2,6

* В строке «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям

Результаты исследований К.А. Горбуновой [40] и Н.П. Торсуева [154, 155] показали, что логарифмически нормальный характер распределения прослеживается и в отношении глубин карстовых провалов. Тяготение средних значений глубин карстовых форм к минимальным значениям характерно для провалов и воронок всех исследуемых районов (таблица 3.4). Этими

же авторами впервые была отмечена прямая корреляционная связь между диаметрами и глубинами воронок. Для поверхностных карстовых форм развитых в пределах исследуемых территорий также наблюдается прямая корреляция между их средними диаметрами и глубинами. Причем в большинстве случаев эта связь носит явный характер и лишь на территории г. Кунгур корреляционная зависимость выражена слабо. После обработки первичной генеральной совокупности и исключения из нее наиболее отклоняющихся от тренда пар значений средних диаметров и глубин для всех исследуемых территорий были получены весьма тесные зависимости между этими параметрами. В таблице 3.5 приведены регрессионные уравнения, которые рекомендуется использовать как прогнозные не только в рамках рассматриваемых территорий, но и с определенной долей погрешности допускается применять при исследованиях в других карстовых районах Пермского края, характеризующихся схожими природными условиями развития карста.

Таблица 3.5. 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	$z = 0,3107d$

* В строке «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям

Большой объем информации по морфометрии полостей и зон дробления, полученный в процессе выполнения комплексной работы «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области» (2006-2010 гг.) [268] и его последующая статистическая обработка позволили установить логнормальный характер распределения вертикальных параметров (мощностей) полостей и зон дробления (таблица 3.3). Распределения средних диаметров и глубин провалов и распределения вертикальных размеров полостей и зон дробления носят один и тот же характер – их средние значения группируются вблизи минимальных. При наличии достаточно большого числа данных по исследуемым морфометрическим параметрам карстовых форм их распределения весьма точно соответствуют логарифмически нормальному закону распределения.

Принимая во внимание отмеченную общность распределений, закономерно возникает вопрос о наличии взаимосвязей между морфометрией поверхностных и подземных форм карста. Заметим, что этот вопрос уже неоднократно поднимался ранее. Так, например, на прямой характер зависимости диаметров провалов от высоты подземных полостей указывали

В.В. Толмачев и Ф. Ройтер [151], В.Н. Андрейчук [27], Г. Адерхолд [26] и некоторые другие исследователи карста. Однако все эти наблюдения либо ограничивались лишь качественной характеристикой зависимости, либо описывали взаимосвязи в рамках отдельно взятого ограниченного по площади участка.

Следует признать, что проследить взаимосвязь между средними диаметрами поверхностных и высотами (мощностями) подземных карстовых форм, а затем представить ее в количественной форме является достаточно сложной задачей. Ее практически невозможно решить стандартными статистическими методами поиска корреляционных зависимостей, что обуславливается сложностью строения закарстованных массивов, а также технической ограниченностью применяемых полевых методов исследования.

В настоящее время наиболее достоверные сведения о наличии подземных карстовых пустот и зон дробления коренных пород и их морфометрии можно получить только по данным изучения карстового массива прямыми методами, основными из которых являются непосредственные наблюдения в естественных подземных пустотах (спелеологический метод) и буровой. Среди косвенных методов изучения строения и состояния карстового массива наиболее эффективны геофизические исследования, рекомендуемые к применению в практике инженерно-геологических изысканий в карстовых районах. Однако результаты геофизических методов исследований, применяемых в сложных геологических условиях, часто неоднозначны в интерпретации. Они требуют обязательного сопоставления с результатами буровых работ. Эффективность геофизических методов при проведении карстологических работ в значительной степени определяется глубиной исследования.

Ввиду невозможности равномерного площадного изучения подземного пространства и, как следствие, установления мощности полостей и зон дробления во всех точках массива, невозможно осуществлять и их непосредственное сопоставление с провалами, происходящими на поверхности. Современными методами исследования устанавливается лишь случайное дискретное расположение карстовых форм в пространстве. В таких условиях оценка зависимостей между морфометрией карстовых форм должна осуществляться комплексированием нескольких подходов. В данной работе использованы следующие процедуры анализа:

- 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:

$$I d_i = \frac{d_i}{\max d}, \quad I z_i = \frac{z_i}{\max z}, \quad I h_{pi} = \frac{h_{pi}}{\max h_p}, \quad I h_{zi} = \frac{h_{zi}}{\max h_z}, \quad (3.2)$$

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.

Данные, приведенные в таблице 3.6, свидетельствуют о том, что средние индексные оценки исследуемых морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления хоть и близки, но не совпадают друг с другом. Данная особенность касается параметров не только поверхностных и подземных карстовых форм в рамках одной территориальной единицы, но и параметров однотипных карстовых форм в пределах различных территорий. Однако в результате обобщения (осреднения) индексных оценок по всем исследуемым районам все морфометрические характеристики за исключением глубины становятся практически одинаковыми.

Таблица 3.6. Сравнение средних индексных значений морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления

Территория исследования*	Средние индексы морфометрии, д.е.			
	провалы		высота полостей	мощность зон дробления
	глубина	диаметр		
г. Кунгур	0,12	0,24	0,12	0,25
пгт Полазна	0,01	0,01	0,14	0,21
Ординский район	0,14	0,12	0,15	0,12
пос. Октябрьский	0,24	0,16	0,13	0,09
ОБЩЕЕ	0,07	0,11	0,11	0,11

* В строке «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям

Дифференциальные кривые распределения, построенные по индексным оценкам средних диаметров, глубин и мощностей карстовых форм, в целом отражают логнормальный характер распределения этих параметров. Лишь в случае распределения мощностей зон дроблений дифференциальные кривые несколько отклоняются от логнормального закона и стремятся к экспоненциальному виду. Примечательным является факт практического совпадения между

собой эмпирических кривых, полученных для различных районов исследования. Данное обстоятельство позволяет переходить к использованию *обобщенных осредненных эмпирических дифференциальных кривых* распределения индексов морфометрии карстовых форм в пределах всех исследуемых территориальных единиц с минимальными потерями в точности прогноза. По обобщенным эмпирическим кривым были подобраны теоретические кривые распределения. Так, обобщенные распределения средних диаметров и глубин провалов, а также высот полостей полностью соответствуют логнормальному закону. Распределение значений обобщенных мощностей зон дробления в целом соответствует логнормальному виду, но, тем не менее, наилучшим образом описывается экспоненциальным законом (рисунок 3.4).

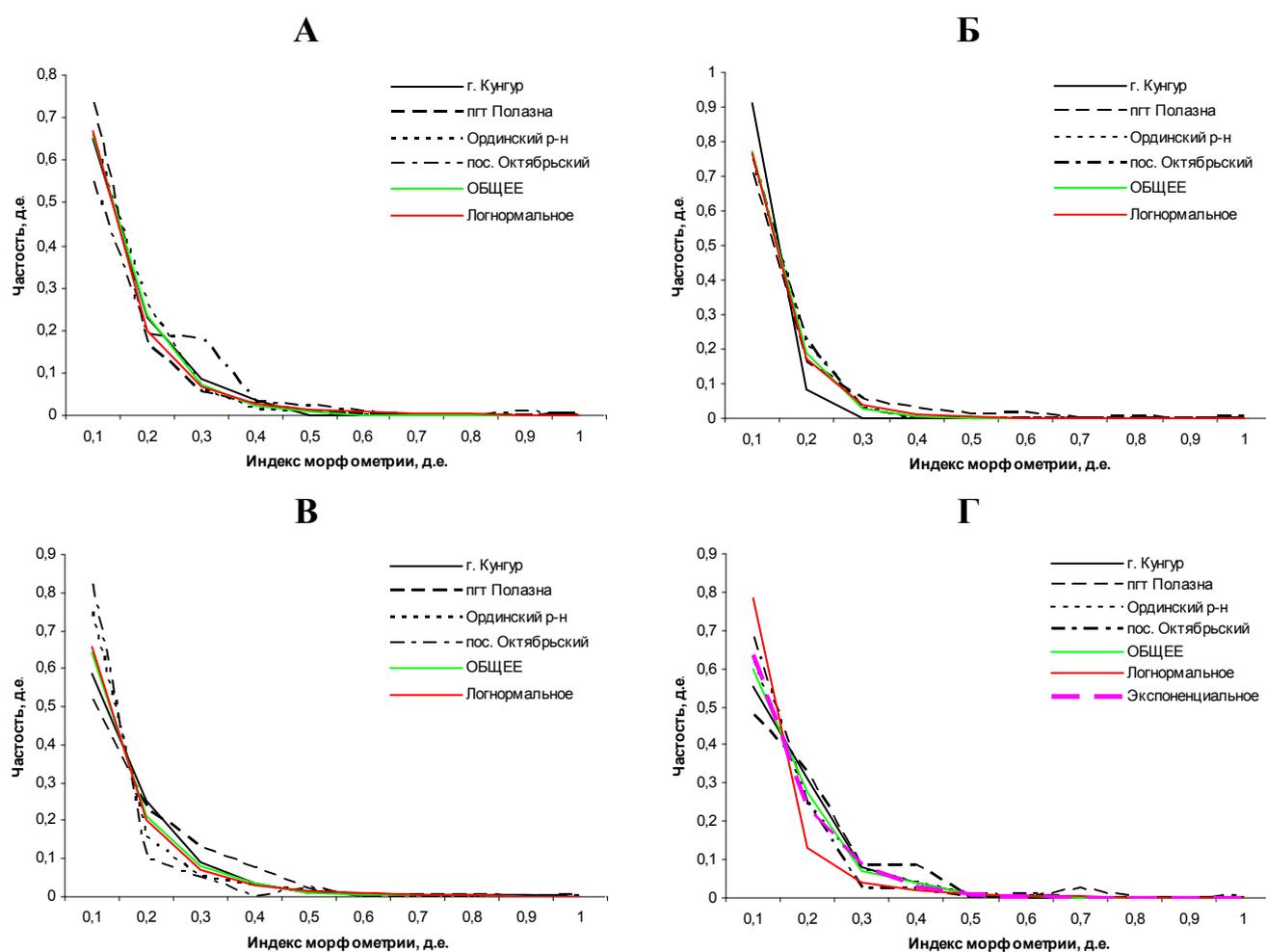


Рисунок 3.4. Дифференциальные кривые распределения индексных оценок: А – средних диаметров провалов, Б – глубин провалов, В – высот карстовых полостей, Г – вертикальных мощностей зон дробления

Сопоставление обобщенных кривых распределений различных морфометрических параметров между собой, выраженных в индексной форме, свидетельствует об их практической идентичности, что позволяет вместо набора кривых распределений каждого из отдельных морфометрических параметров использовать одно распределение, в интегрированной форме отражающее каждое из них. Это интегрированное распределение можно получить путем общего

осреднения всех частных распределений отдельных морфометрических параметров карстовых форм. При этом теоретическая кривая логнормального распределения средних диаметров провалов, выраженных в индексной форме, в достаточной степени соответствует обобщенной интегрированной кривой распределения (рисунок 3.5).

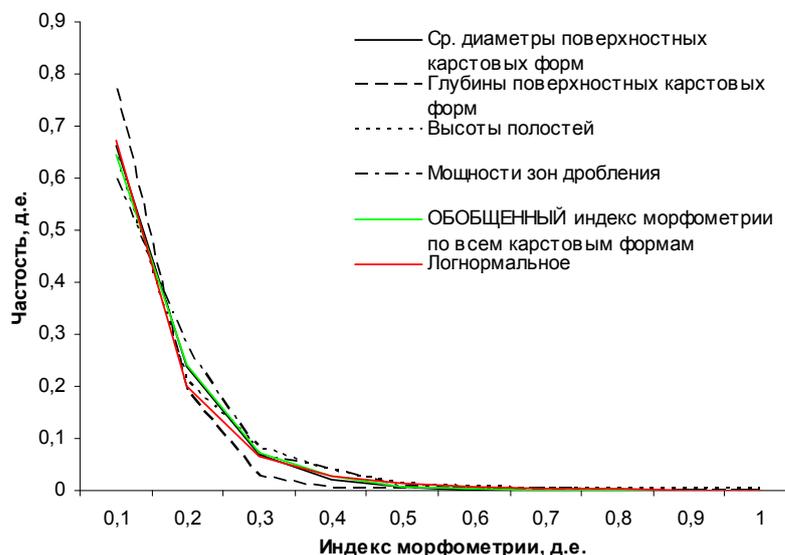


Рисунок 3.5. Дифференциальные кривые распределения обобщенных индексных оценок морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм в рамках всех рассматриваемых территориальных единиц

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.

Однако совпадение распределений морфометрических характеристик поверхностных и подземных карстовых форм хоть и является прямым индикатором их взаимозависимости, но отнюдь не дает гарантий того, что между ними имеются тесные корреляционные связи. 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.

Приведенные в таблице 3.7 данные свидетельствуют о том, что в площадном отношении в пределах всех исследуемых территорий наиболее развиты карстовые формы с относительно небольшими диаметрами и высотами (менее 0,2 в индексном выражении). С увеличением средних размеров провалов, полостей и зон дробления площади их пространственного развития заметно сокращаются. Так, на долю относительно крупных карстовых форм с индексом морфометрии, превышающим 0,5, приходится менее 10 процентов исследуемых площадей. Такая тенденция в одинаковой мере свойственна как поверхностным, так и подземным

карстовым формам. Принимая это во внимание, а также логнормальный характер их распределения становится очевидным наличие определенной зависимости между однопорядковыми значениями морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм и доли площади, которую занимают эти формы на исследуемой территории.

Таблица 3.7. Площади распространения карстовых форм и зон дробления, характеризующихся соответствующими интервалами значений индексов морфометрии

Интервалы значений индексов морфометрии, д.е.	Площади распространения карстовых форм и зон дробления, %																			
	г. Кунгур				пгт Полазна				Ординский район				пос. Октябрьский				ВСЕ рассматриваемые территории			
	провалы	полости	зоны дробления	ВСЕ	провалы	полости	зоны дробления	ВСЕ	провалы	полости	зоны дробления	ВСЕ	провалы	полости	зоны дробления	ВСЕ	провалы	полости	зоны дробления	ВСЕ
<0,1	15,4	15,7	5,4	36,6	0,6	2,9	1,3	4,8	0,5	0,7	1,2	2,3	0,9	0,8	3,0	4,7	17,4	20,1	10,9	48,4
0,1-0,2	5,6	7,3	7,1	20,0	0,8	2,8	2,0	5,6	0,4	0,6	0,6	1,6	0,9	2,1	3,0	6,0	7,7	12,8	12,7	33,3
0,2-0,3	3,7	1,3	8,3	13,3	1,3	0,5	1,4	3,2	0,4	0,2	0,3	0,8	1,7	0,5	0,8	3,0	7,0	2,5	10,8	20,4
0,3-0,4	4,2	0,8	5,2	10,2	1,0	0	1,2	2,2	0,4	0,1	0	0,5	1,4	0,1	0,5	2,0	7,0	0,9	6,9	14,9
0,4-0,5	2,1	0,5	2,3	4,9	0,9	0	0,2	1,1	0,2	0	0	0,3	1,1	0	0,1	1,2	4,3	0,6	2,6	7,5
0,5-0,6	1,1	0,2	1,9	3,1	0,7	0	0,1	0,8	0,1	0	0	0,1	0,7	0	0	0,7	2,6	0,2	2,0	4,8
0,6-0,7	0,7	0,2	0,7	1,6	0,6	0	0	0,6	0,1	0	0	0,1	0,4	0	0	0,4	1,8	0,2	0,7	2,7
0,7-0,8	0,3	0,2	0,3	0,8	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0,2	0	0	0,3	1,1	0,2	0,3	1,6
0,8-0,9	0,1	0	0,1	0,3	0,4	0	0	0,4	0	0	0	0	0,2	0	0	0,2	0,7	0	0,2	0,9
0,9-1,0	0,1	0	5,4	5,5	0,7	0	0	0,7	0	0	0	0	0,2	0	0	0,2	1,0	0	5,4	6,4

В соответствии с действующими нормативными документами [10, 16, 22-24] закарстованные территории подразделяются на 4 категории по средним диаметрам поверхностных карстовых форм. Ранее нами уже отмечалось, что граничные значения между различными категориями устойчивости в нормативных документах заданы с учетом логнормального характера распределения диаметров, что выражается в увеличении размера каждой последующей категории. Принимая во внимание фактическое совпадение распределений индексных оценок морфометрических характеристик поверхностных и подземных карстовых форм, а также распределений их площадей в равных интервалах были получены аналогичные граничные значения и для подземных форм карста путем умножения обобщенной индексной оценки на их территориальный максимум (таблица 3.8).

Построенные по данным таблицы 3.8 цифровые картографические модели изменчивости морфометрических характеристик карстовых форм и зон дробления, наложенные друг на друга, позволяют осуществлять их визуальное и аналитическое сравнение (рисунок 3.6). В последнем случае сравнение основывается на автоматизированном подсчете площадей пересечений различных категорий устойчивости, выделенных по средним диаметрам провалов, высотам (мощностям) полостей и зон дробления. Принципы сопоставления категорий устойчивости по различным карстовым формам приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.8. Нормативные категории устойчивости по средним диаметрам провалов и соответствующие им средние высоты полостей и мощности зон дробления

Категория устойчивости	Параметры карстовых форм и зон дробления		
	диаметры провалов	высоты полостей	мощности зон дробления
А	>20	>3,6	>6,3
Б	20-10	3,6-1,8	6,3-3,2
В	10-3	1,8-0,5	3,2-1,0
Г	<3	<0,5	<1,0

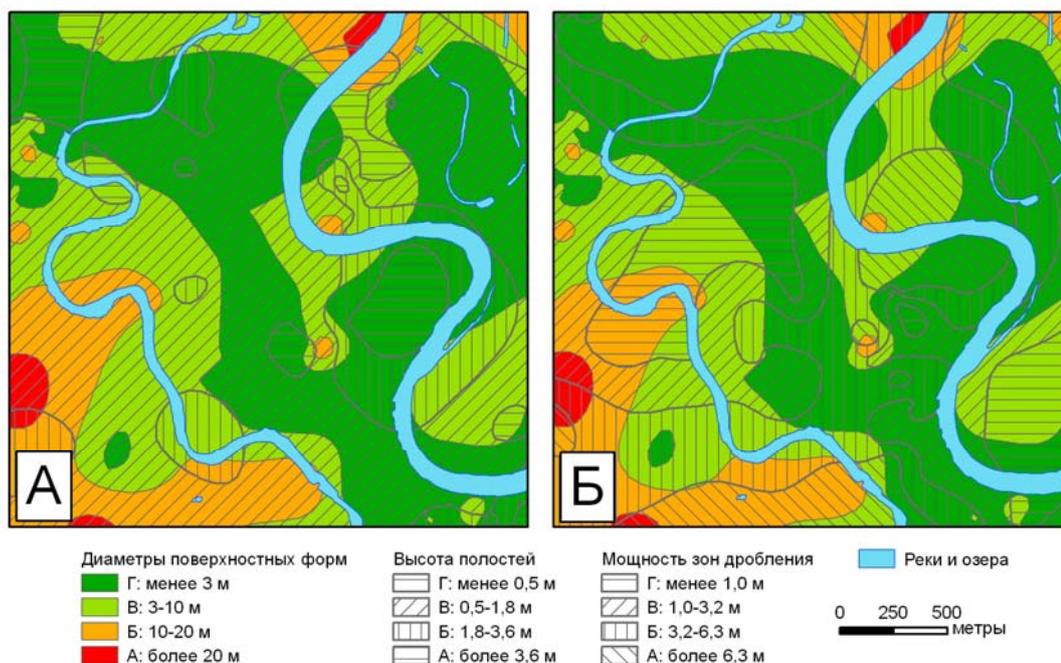


Рисунок 3.6. Пример сопоставления категорий устойчивости на территории г. Кунгур, выделенных по исследуемым морфометрическим параметрам: А – провалов и полостей, Б – провалов и зон дробления

Таблица 3.9. Сопоставление категорий устойчивости, выделенных по средним диаметрам поверхностных и высотам подземных карстовых форм и зон дробления

Совпадение	Принцип выделения	Пример
Плохое	Диаметральное различие категорий устойчивости	А-Г-Б, Г-А-В
Нормальное	Различие категорий устойчивости на два порядка	А-В-Б, Б-Г-В
Хорошее	Различие категорий устойчивости на один порядок	Б-В-Б, А-Б-А
Отличное	Полное совпадение категорий устойчивости	А-А-А, Г-Г-Г

Совпадение категорий устойчивости, выделенных на основе нормативных рекомендаций и с учетом общности распределений параметров рассматриваемых карстовых форм, характеризуется как «хорошее» и «отличное» (рисунок 3.7). Причем общая доля «хороших» и «отличных» совпадений в площадном выражении значительно превосходит долю «плохих» и «нормальных» совпадений и составляет 70-80%.

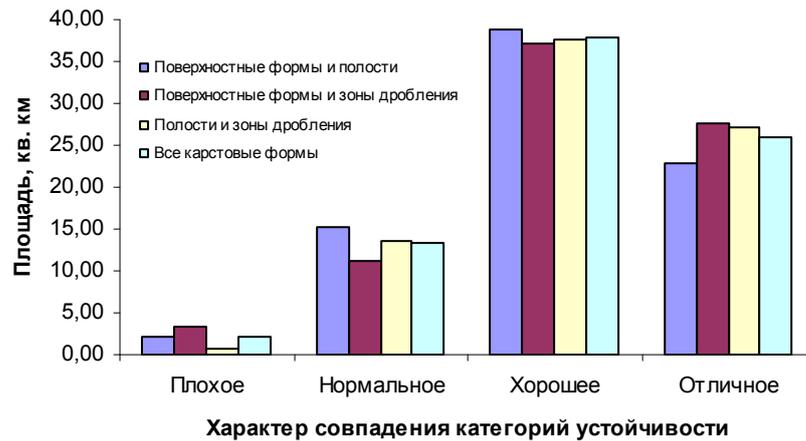


Рисунок 3.7. Характеристика совпадения категорий устойчивости и занимаемых ими площадей

Наличие общности распределений и фактическое совпадение площадей распространения подземных и поверхностных карстовых форм с близкими морфометрическими параметрами позволяет заключить о тесном характере взаимосвязи между их средними диаметрами и высотами. Принимая это во внимание, становится возможным осуществлять прогнозирование рассматриваемых морфометрических параметров одних карстовых форм по другим, отталкиваясь от их индексных оценок. Например, при диаметре карстового провала равном 6,0 м вероятная средняя высота обрушившейся полости и средняя вертикальная мощность возможной зоны дробления составят, соответственно, 1,1 м и 1,9 м. С увеличением среднего диаметра до 15,0 м параметры рассматриваемых подземных карстовых форм будут равны, соответственно 2,7 м и 4,7 м. Приведенные соотношения высот полостей и диаметров провалов хорошо согласуется с результатами исследований В.Н. Андрейчука [27] в районе пещеры Золушка в Приднестровской Подолии и в пределах массива Ледяная гора в г. Кунгур. Общая последовательность данных вычислений заключается в делении рассматриваемой известной величины среднего диаметра провала на его территориальный максимум, в результате которого получается индексная оценка этого параметра, после чего осуществляется умножение индексного значения на территориальные максимумы морфометрических характеристик подземных карстовых форм и определяются их вероятные значения. Рекомендуемые параметры для осуществления прогноза приведены в таблице 3.10, а на рисунке 3.8 представлены прогнозные прямые, построенные по табличным данным. Заметим, что таким образом возможно осуществлять и обратные прогнозы – определения средних диаметров провалов по известным значениям высот полостей или мощностей раздробленных зон.

Таблица 3.10. 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		

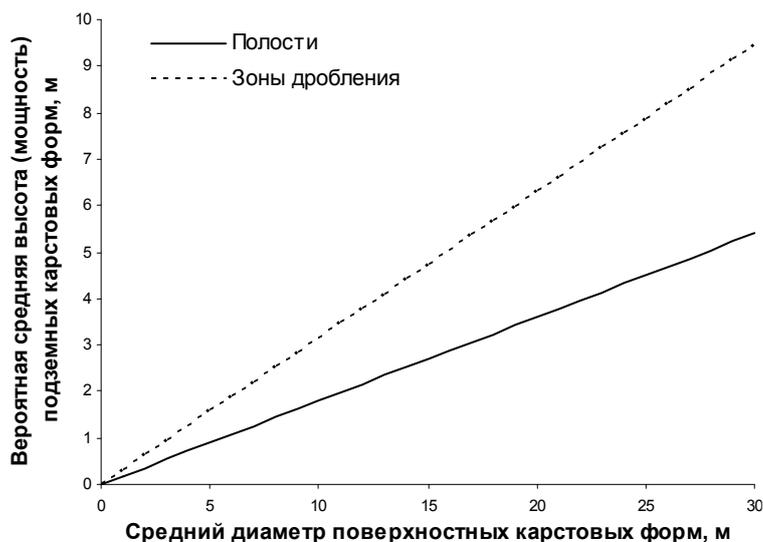


Рисунок 3.8. Взаимосвязь между средними диаметрами провалов и высотами (мощностями) карстовых полостей и зон дробления

Следует понимать, что установленная зависимость не является универсальной. Она лишь выражает принципиальный характер взаимосвязи между исследуемыми размерами поверхностных и подземных карстовых форм. Их высота в данном случае выступает в роли ключевого фактора. Именно этот параметр оказывает наиболее сильное влияние и во многом предопределяет вероятные размеры вновь образующихся провалов на поверхности земли. Однако в природе нередки случаи, когда фиксируются значительные отклонения от установленной взаимосвязи. Согласно рисунку 3.7 в пределах исследуемых территорий такие отклонения наблюдались в 20% случаев («плохое» и «нормальное» совпадение категорий устойчивости). Это во многом предопределяется действием целого ряда «общих» факторов, таких как гипсометрическое положение полости (зоны дробления), свойства карстующихся пород и грунтов перекрывающей толщи, их мощность и характер залегания, особенности урванного режима и химизма подземных вод, а также локальный структурный план территории.

Подводя итог, следует еще раз отметить генеральный характер зависимости между средними диаметрами провалов и высотами (мощностями) карстовых полостей и зон дробления в пределах рассматриваемых территорий. Расширение географии исследования с привлечением большего количества сведений о природном строении закарстованных территорий, по-видимому, позволит внести некоторые коррективы, но принципиальный характер взаимосвязи останется прежним. Принимая это во внимание, полученные результаты могут быть использованы при исследованиях на закарстованных территориях в рамках всего Пермского края. В практических целях применение настоящих результатов может быть оправданным при изысканиях на предпроектных стадиях строительства. Изыскания на стадии разработки проекта и рабочей документации требуют дополнительной корректировки получаемых сведений о морфометрии карстовых форм с привлечением как можно большего количества данных о влиянии отдельных показателей природного строения на изучаемые параметры.

3.4. Взаимосвязи между показателями природного строения и карстовыми формами

3.4.1. Методика проведения анализа

Оценка влияния рассматриваемых показателей природного строения на интенсивность развития карста осуществляется посредством их сопоставления с исследуемыми карстовыми формами и их параметрами. Целью сопоставления является установление: 1) эмпирических и теоретических распределений карстовых форм по показателям природного строения; 2) характера зависимости морфометрических параметров карстовых форм от значений исследуемых показателей. Для этого используются 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 (рисунок 3.9, А). Далее на эти модели «накладываются» рассматриваемые карстовые формы (рисунок 3.9, Б), каждой из которых присваивается значение показателя в точке ее локализации (рисунок 3.9, В).

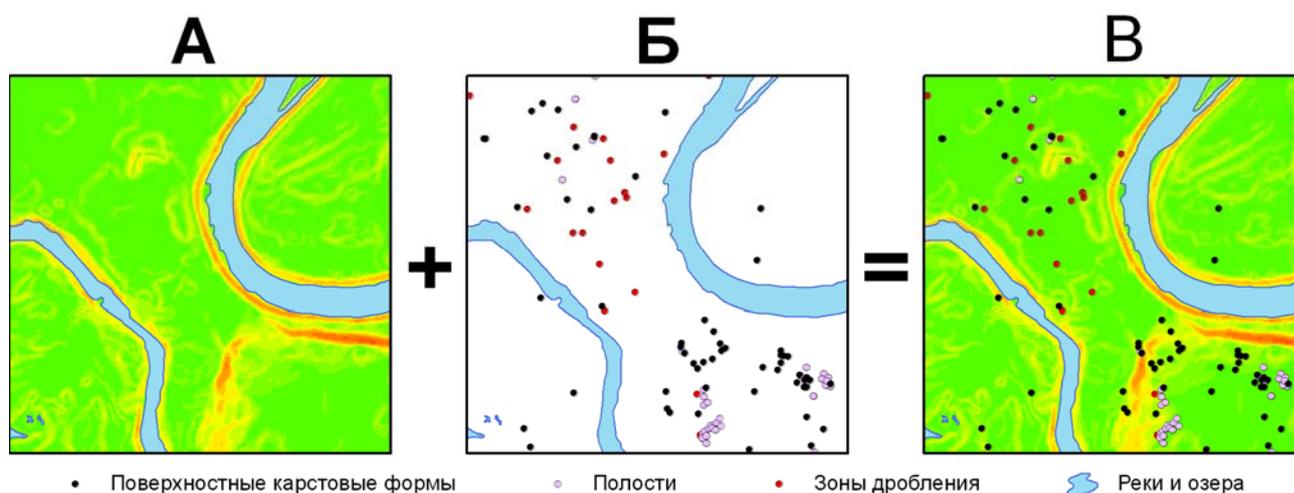


Рисунок 3.9. Пример картографического сопоставления показателей природного строения и карстовых форм

С целью возможности разнопланового сопоставления и сравнения результатов, исследуемые показатели природного строения приводятся к общему виду посредством их нормализации. Данная процедура практически аналогична таковой, производимой в случае изучения морфометрических параметров карстовых форм. Отличие заключается лишь в том, что максимальные значения показателей устанавливаются не в пределах изучаемой площади, а в местах локализации карстопроявлений (таблица 3.11). Такой подход к выделению максимумов позволяет устанавливать более точные связи и зависимости, так как природные условия непосредственно напрямую противопоставляются карстовым формам. Расчетная формула для оценки индексных значений в данном случае имеет следующий вид:

$$Ix_i = \frac{x_i}{\max x}, \quad (3.3)$$

где Ix_i – индексная оценка i -го значения показателя x , д.е.

В результате сопоставления картографических цифровых моделей исследуемых показателей природного строения и карстовых форм были определены их максимальные значения в местах локализации карстопроявлений. Данные максимумы используются при оценке индексных значений показателей.

Количественное распределение карстовых форм по показателям природного строения выражается в графической форме в виде гистограмм или кривых плотности распределения (рисунок 3.10). По оси абсцисс откладываются значения показателей природных условий, а по оси ординат – частота встречаемости карстовых форм в равных интервалах значений исследуемых показателей.

После выявления частных распределений рассматриваемых разновидностей карстовых форм по отдельности устанавливается общее распределение всех рассматриваемых в анализе

форм карста путем совместного осреднения их частостей (рисунок 3.10, утолщенная черная кривая). Таким образом, общее распределение в интегральной форме суммирует вклад всех отдельных карстовых форм.

Таблица 3.11. Максимальные значения показателей природного строения в пределах исследуемых территорий в местах локализации карстовых форм

№ п/п	Показатель	Территория исследования				
		г. Кунгур	пгт Полазна	Ординский район	пос. Октябрьский	ВСЕ*
Структурно-тектонические показатели St						
1	Линейная плотность линеаментов L_l , км/км ²	11,2	14,7	-	5,0	14,7
2	Количество пересечений линеаментов M_l , шт./км ²	31,8	70,7	-	9,1	70,7
3	Блочность B_l , км ²	2,19	0,36	-	2,86	2,86
4	Удаленность от линеаментов R_l , м	347,0	192,1	-	665,0	665,0
Геологические показатели G						
5	Мощность четвертичных отложений m_Q , м	36,6	17,6	28,7	24,5	36,6
6	Мощность неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений m_{NQ} , м	41,3	65,0	21,7	25,9	65,0
7	Мощность отложений покровной толщи m_p , м	80,7	75,1	34,6	26,7	80,7
Гидрогеологические показатели Hg						
8	Глубина установления грунтовых вод H_Q , м	19,6	13,5	14,4	-	19,6
9	Глубина установления трещинно-карстовых вод H_k , м	81,4	69,2	31,6	46,7	81,4
10	Минерализация подземных вод M , г/дм ³	21,2	19,3	16,0	1,0	21,2
Геоморфологические показатели Ge						
11	Уклон рельефа β , °	38,8	47,3	28,0	29,4	47,3
12	Превышение над средним уровнем рек ΔH , м	91,5	114,7	88,8	66,2	114,7
13	Удаленность от речной сети U , м	3028,7	1812,4	1846,6	1599,2	3028,7
14	Уклон водосбора $\tan \alpha$, д.е.	0,50	2,22	1,87	0,60	2,22
Инженерно-геологические показатели Eg						
15	Модуль общей деформации грунтов покровной толщи E_0 , МПа	33,7	39,6	19,9	33,7	39,6
16	Угол внутреннего трения грунтов покровной толщи φ , °	36,8	38,4	27,9	29,5	38,4
17	Удельное сцепление грунтов покровной толщи c , кПа	51,7	52,5	42,7	58,5	58,5

* В столбце «ВСЕ» указаны максимальные значения показателей в пределах всех исследуемых территорий

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. Наконец, точность прогнозирования с применением семейства нормального закона

распределения является достаточно высокой, о чем свидетельствуют результаты ранее выполненных исследований [184, 253].

Установление параметров теоретического закона распределения (среднее значение и среднеквадратическое отклонение значений анализируемых показателей природного строения) осуществляется с применением стандартных формул математической статистики. Наиболее подходящее теоретическое распределение, в большей степени соответствующее эмпирическому общему распределению всех карстовых форм по исследуемому показателю строения, устанавливается исходя из физического смысла анализируемого показателя, а также по наилучшей сходимости эмпирической (рисунок 3.10, утолщенная черная кривая) и теоретической (рисунок 3.10, утолщенная красная штрихпунктирная кривая) кривых плотности распределения.

Знание характера эмпирического распределения карстовых форм по значениям исследуемого показателя природного строения и параметров теоретического закона позволяет устанавливать характер опасности проявления карста в границах изучаемого участка или в отдельной конкретной точке пространства.

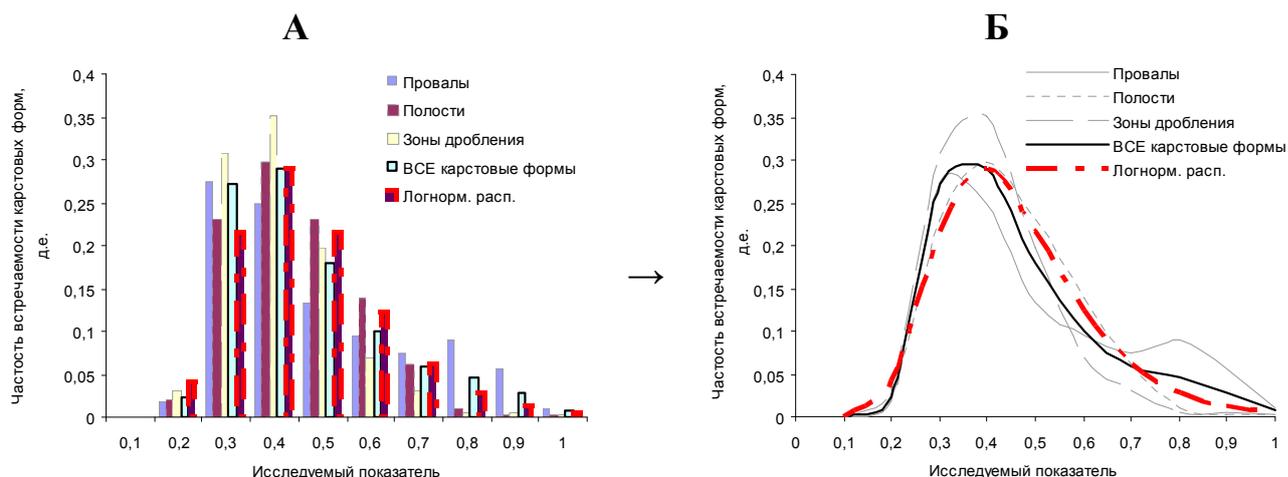


Рисунок 3.10. Пример осуществления графического анализа распределений карстовых форм по показателям природного строения, выраженным в индексной форме и представленного в виде: А – гистограмм; Б – кривых плотности распределения

О возможности выявления характера взаимосвязей между отдельными факторами природных условий и диаметрами карстовых провалов с использованием методов математической статистики отмечалось в ряде крупных отечественных работ, посвященных карстологической тематике [149, 151]. Согласно В.В. Толмачеву и др. [149] достоверное установление таких связей возможно при достаточном количестве исходных данных и при условии, что оцениваемые показатели природных условий носят содержательный характер, т.е. напрямую характеризуют активность протекания карстового процесса. Согласно авторам один из подготовительных этапов для осуществления такого анализа заключается в разбиении

значений оцениваемых показателей природных условий на ряд отдельных интервалов или признаков (классов).

Оценка взаимосвязи между морфометрическими параметрами карстовых форм и показателями природного строения в данном исследовании осуществляется путем их прямого сопоставления. Оно заключается в противопоставлении исследуемой морфометрической характеристики каждой отдельно взятой карстовой формы значению исследуемого показателя в точке локализации этой формы. В результате дифференцировано по каждому из типов карстовых форм строятся двухмерные облака точек, характеризующие зависимость морфометрических параметров от значений исследуемых показателей (рисунок 3.11, А). Переход к индексной форме выражения показателей природных условий и морфометрических параметров карстовых форм позволяет сопоставлять различные карстовые формы друг с другом и производить их совместный анализ (рисунок 3.11, Б).

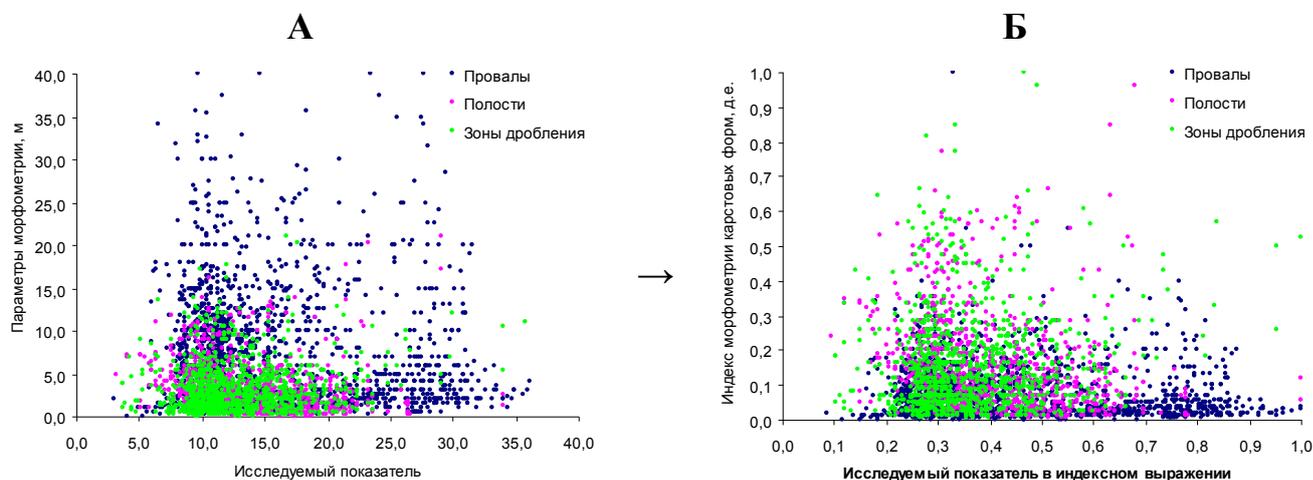


Рисунок 3.11. Точечный график зависимости морфометрических параметров карстовых форм от значений исследуемого показателя: А – значения выражены в истинной форме; Б – значения характеристик выражены в индексной форме

Однако диаграммы, приведенные на рисунке 3.11, не являются информативными, т.к. 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 3.12, А). Данная процедура позволяет оценить направленность наблюдаемой зависимости, а в некоторых случаях, и установить ее характер (линейная, экспоненциальная, логнормальная и др.).

В преобладающем ряде случаев на фоне тренда наблюдаются отклонения средних значений морфометрических параметров от общей направленности (см. рисунок 3.12, Б, класс 0,6-0,7 по зонам дробления). 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, несвойственные общей зависимости, исключаются из анализа. Если зафиксированное отклонение от тренда приурочено к классу, в пределах которого встречается менее 5% карстовых форм от их общего количества, то данное отклонение считается аномальным и класс исключается из анализа.

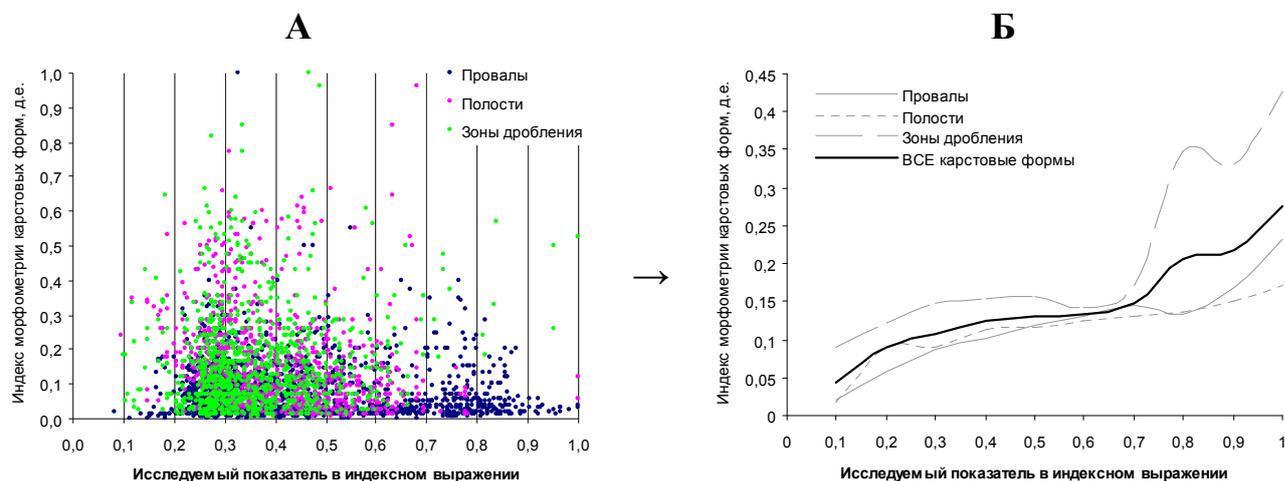


Рисунок 3.12. Определение тренда зависимости морфометрических параметров карстовых форм от значений исследуемого показателя (пояснение см. в тексте)

В редких случаях аномальные отклонения от тренда приурочены к классу-интервалу представленному достаточно большим количеством карстовых форм. Такая ситуация, когда среднее значение морфометрических параметров карстовых форм определено по достаточно большой выборке и выбивается из наблюдаемого общего тренда, может быть объяснена рядом причин. Иногда она вызвана наличием ошибок, допущенных на ранних стадиях анализа, слабой степенью влияния анализируемого показателя на карстовый процесс. Однако наиболее часто такие отклонения связаны с неоднозначностью трактовки самих морфометрических характеристик. Ввиду ограниченности поставленного мониторинга за процессом провалообразования в пределах исследуемых территорий имеющиеся в распоряжении сведения о первоначальных морфометрических параметрах провальных воронок недостаточны. Вследствие данного обстоятельства в общей статистической обработке участвуют как молодые, так и древние провальные воронки. В случае последних установить их первоначальные морфометрические характеристики не представляется возможным. Немаловажным фактором является отсутствие данных о природе и механизме образования порядка 70% исследуемых воронок, в результате чего разделение их по генетическому принципу не представляется возможным. Еще большей неоднозначностью характеризуются подземные карстопроявления, в правильности выделения которых в разрезе буровой скважины большую роль играет

субъективное мнение геолога, контролирующего процесс бурения и производящего описание буровой колонки.

Несмотря на отмеченные недостатки, рассматриваемый подход практически всегда позволяет получить однозначное решение задачи по выявлению связи между морфометрией карстовых форм и исследуемыми показателями природного строения. При этом решение будет тем объективнее, чем больше размер исследуемой выборки или чем большее количество данных подвергается статистической обработке.

3.4.2. Показатели структурно-тектонической группы

В пределах исследуемых территорий по данным анализа аэро- и космоснимков различного разрешения выделяются линеаменты разных порядков (рисунок 3.13). Анализ их площадного развития с применением четырех показателей линеаментной тектоники позволяет осуществлять прогноз структурно-тектонических условий исследуемых площадей.

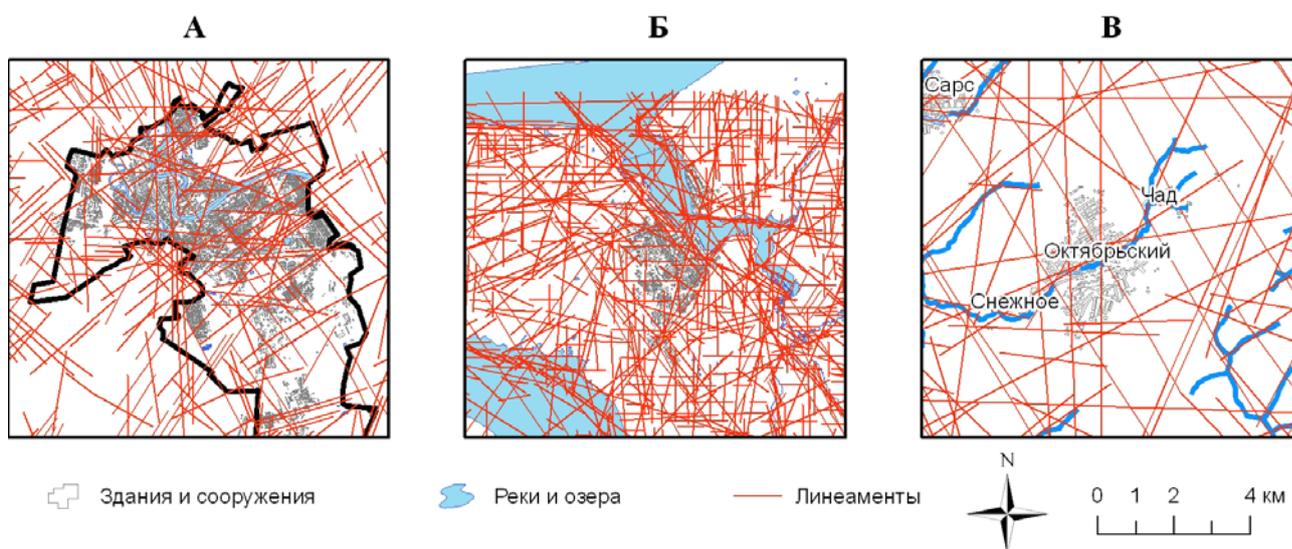


Рисунок 3.13. Распространение сети линеаментов на территории: А – г. Кунгур, Б – пгт Полазна и его окрестностей, В – пос. Октябрьский

Приведенные ниже зависимости и выводы в более полной форме изложены в работах Д.Р. Золотарева [58-62].

Анализ общих распределений поверхностных и подземных карстовых форм по значениям показателя линейной плотности линеаментов показал, что их максимумы в пределах исследуемых территорий не совпадают. На территории г. Кунгур большая часть карстовых форм в целом тяготеет к средним значениям этого показателя ($4-7 \text{ км/км}^2$). В пределах пгт Полазна и пос. Октябрьский максимумы встречаемости карстовых форм тяготеют к повышенным и максимальным значениям показателя линейной плотности и варьируют, соответственно, в

пределах 10-13 и 2,5-4,5 км/км². При этом максимумы встречаемости провалов несколько смещены от максимумов, отмеченных для полостей и зон дробления в сторону больших значений. Исключением от наблюдаемой тенденции является территория пос. Октябрьский, где в границах участков с наибольшими значениями плотности линеаментов локализована большая часть зон дробления (рисунок 3.14).

При рассмотрении распределений карстовых форм по показателю линейной плотности линеаментов, локализованных в пределах всех исследуемых территорий, в рамках единой совокупности отмечается повышение их однородности, а также тенденции к локализации в рамках общего единого максимума, тяготеющего к интервалу значений 4,5-7,5 км/км². Однако в распределении провалов в данном случае наблюдается два максимума. Общее наблюдаемое распределение всех карстопроявлений по всем рассматриваемым районам хорошо описывается логнормальным законом распределения.

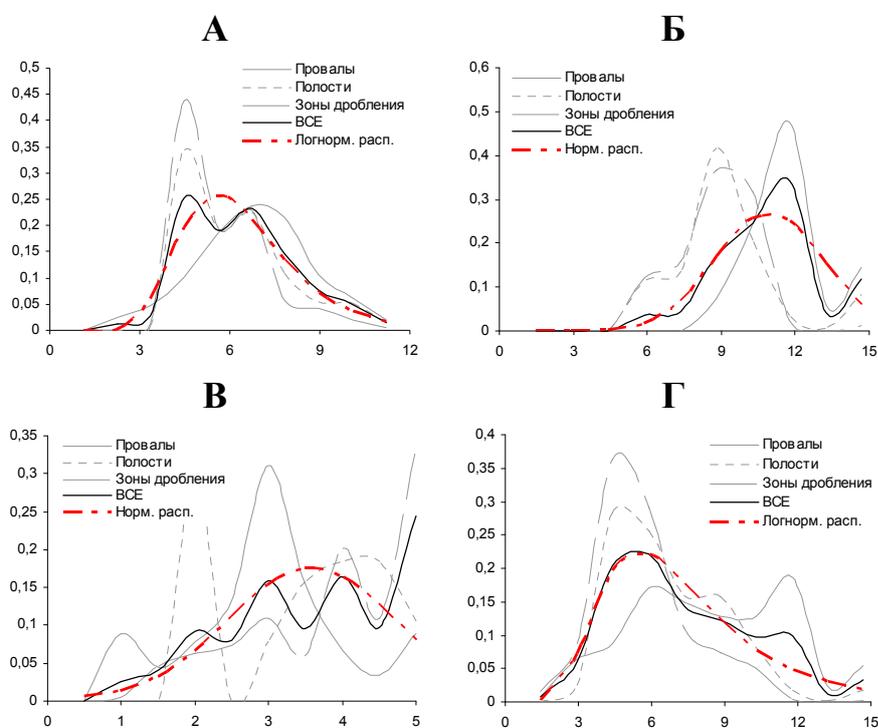


Рисунок 3.14. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений линейной плотности линеаментов (ось X), км/км², в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

Логарифмически нормальный характер носят как общие, так и частные распределения отдельных карстовых форм по значениям оставшихся трех показателей, участвующих в анализе – количества пересечений линеаментов, блочности и удаленности от линеаментов. Неоднородные картины характерны только для территории пгт Октябрьский, где распределения имеют сложную форму (рисунки 3.15-3.17). В целом же, абсолютное большинство

карстопроявлений тяготеет к минимальным значениям этих показателей, не превышающим 0,2 в индексном выражении.

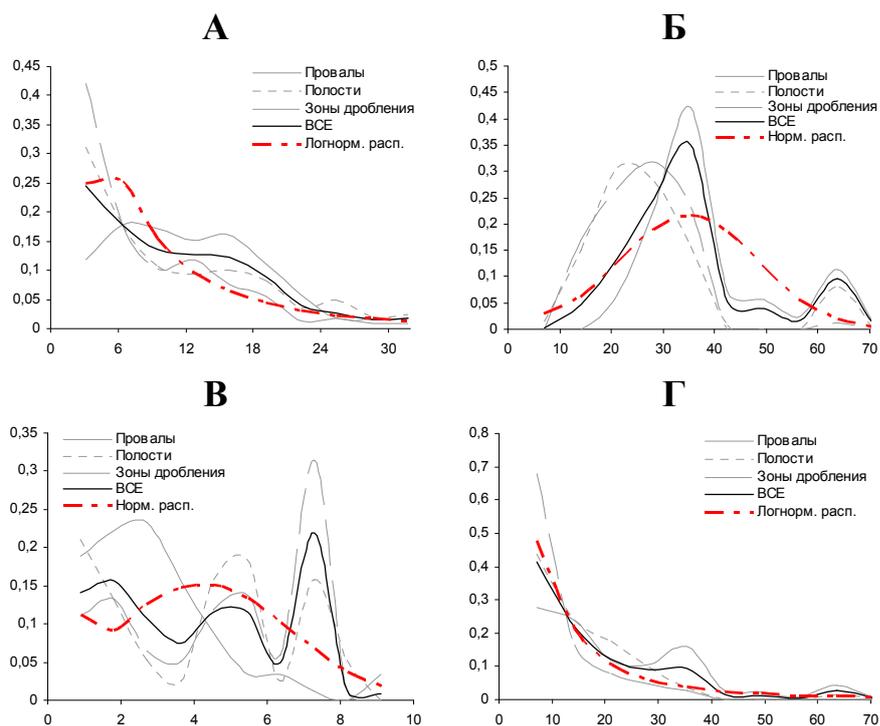


Рисунок 3.15. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений показателя количества пересечений линейментов (ось X), шт./км², в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

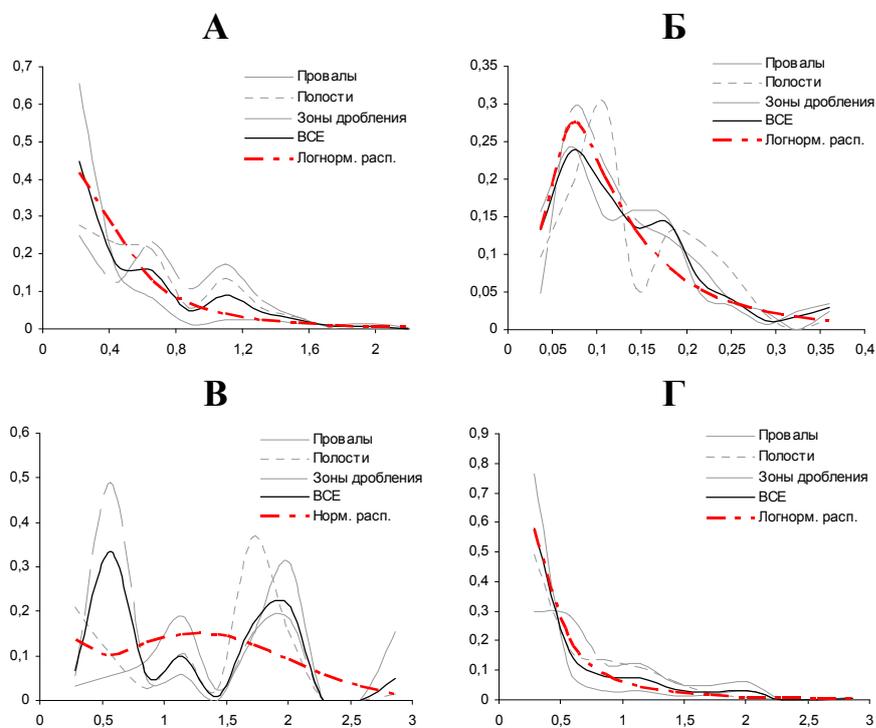


Рисунок 3.16. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений блочности (ось X), км², в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

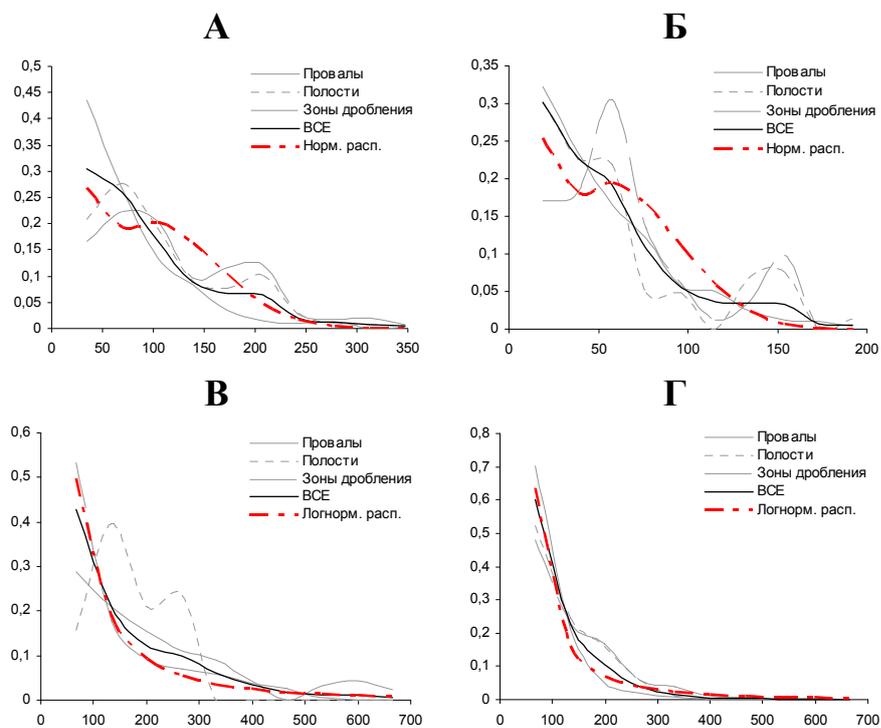


Рисунок 3.17. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удаленности от линеаментов (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

В результате анализа взаимосвязи между показателями линеаментной тектоники и морфометрическими параметрами карстовых форм было установлено, что с повышением значений линейной плотности линеаментов и количества их пересечений наблюдается общее снижение средних диаметров поверхностных и высот подземных карстовых форм. Наиболее устойчиво данная тенденция проявляется на территориях г. Кунгур и пос. Октябрьский. В пределах Полазненского поселения городского типа явного тренда выявить не удалось, несмотря на незначительное общее снижение морфометрических характеристик, наблюдаемое по совокупности всех карстопоявлений, локализованных в границах поселка. Заметим, что наименее ясная направленность исследуемой зависимости проявляется при анализе высот и мощностей полостей и зон дробления. Последние в ряде случаев и вовсе характеризуются противоположным отклонением от общего тренда (рисунки 3.18-3.19).

Прямой характер зависимости был установлен в отношении показателей линеаментной блочности и удаленности от линеаментов. Устойчивое возрастание морфометрических характеристик всех исследуемых карстовых форм наблюдается с увеличением значений показателя блочности. Подобно рассмотренным выше случаям с показателями линейной плотности и количества пересечений линеаментов, неявный характер направленности отмечается лишь в пределах пгт Полазна, где не выявлено какой-либо взаимосвязи между значениями блочности и средними диаметрами провалов и высотами полостей. Практически

аналогичная картина наблюдается в отношении показателя удаленности от линеаментов (рисунки 3.20-3.21).

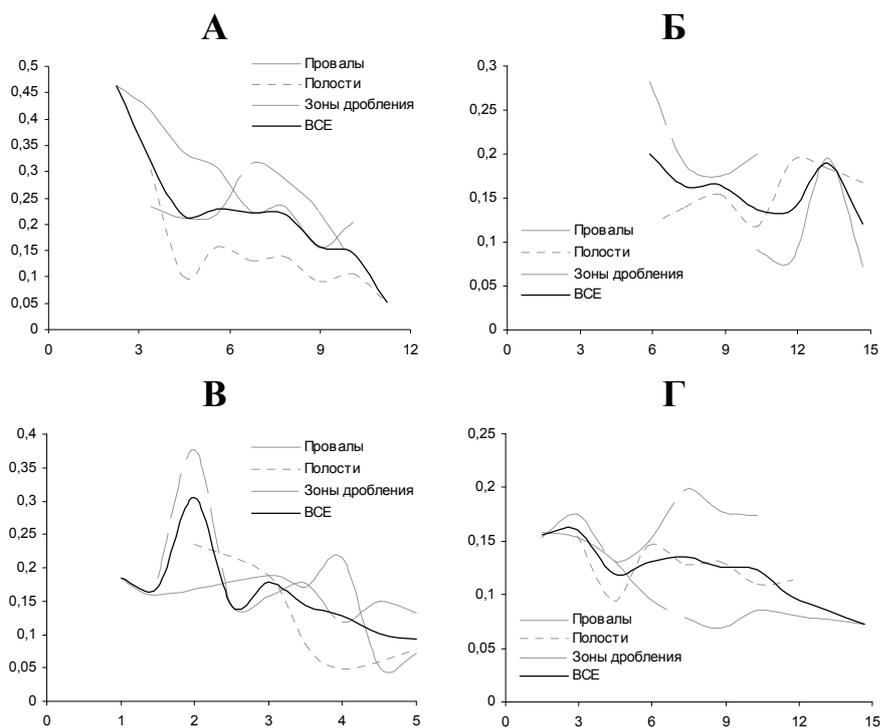


Рисунок 3.18. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений линейной плотности линеаментов (ось X), км/км², в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

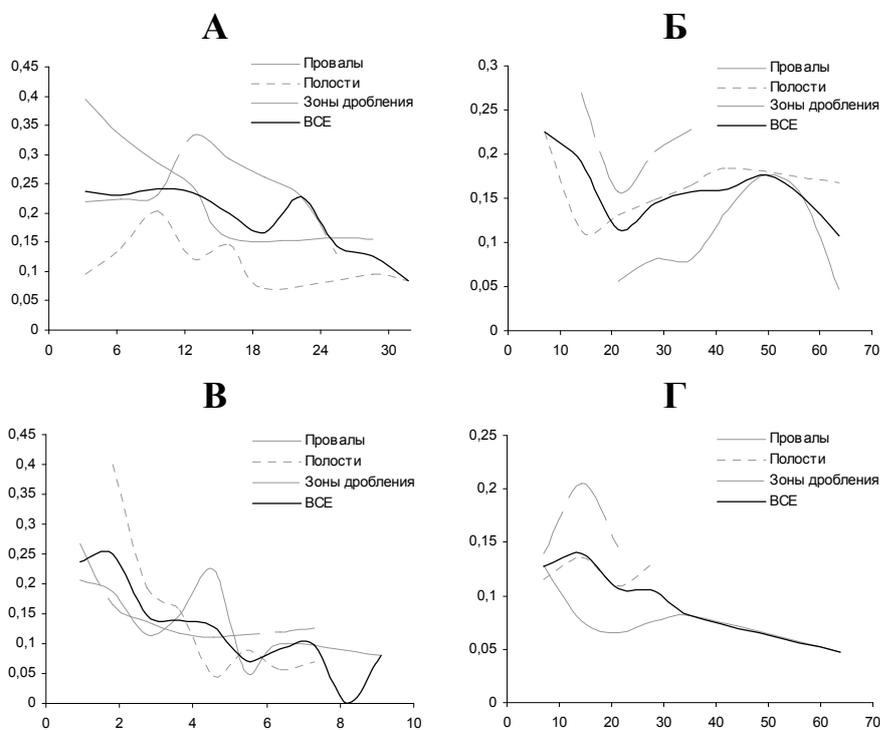


Рисунок 3.19. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений показателя количества пересечений линеаментов (ось X), шт./км², в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

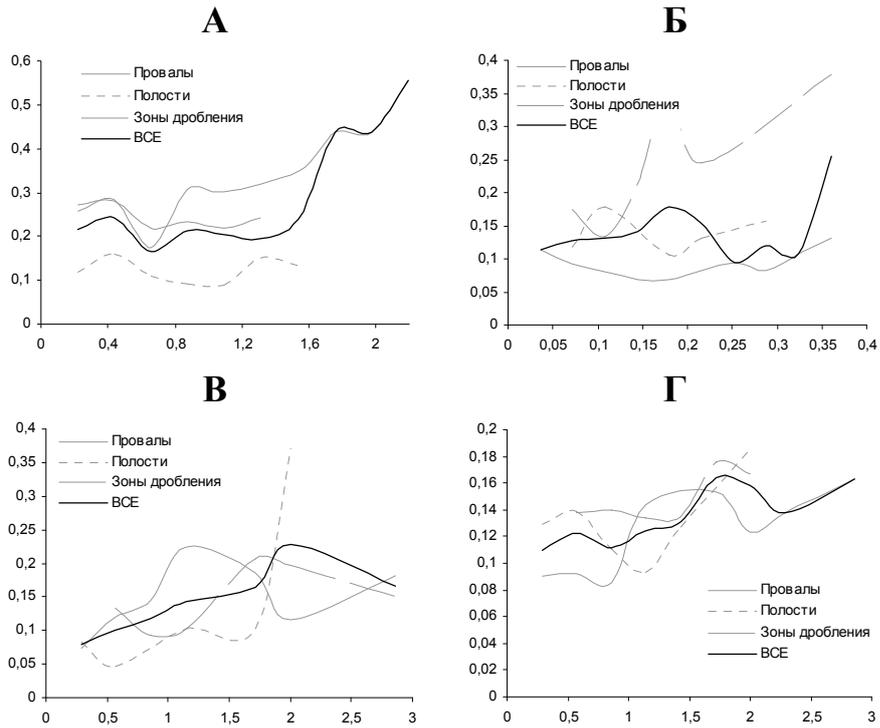


Рисунок 3.20. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений блочности (ось X), км², в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

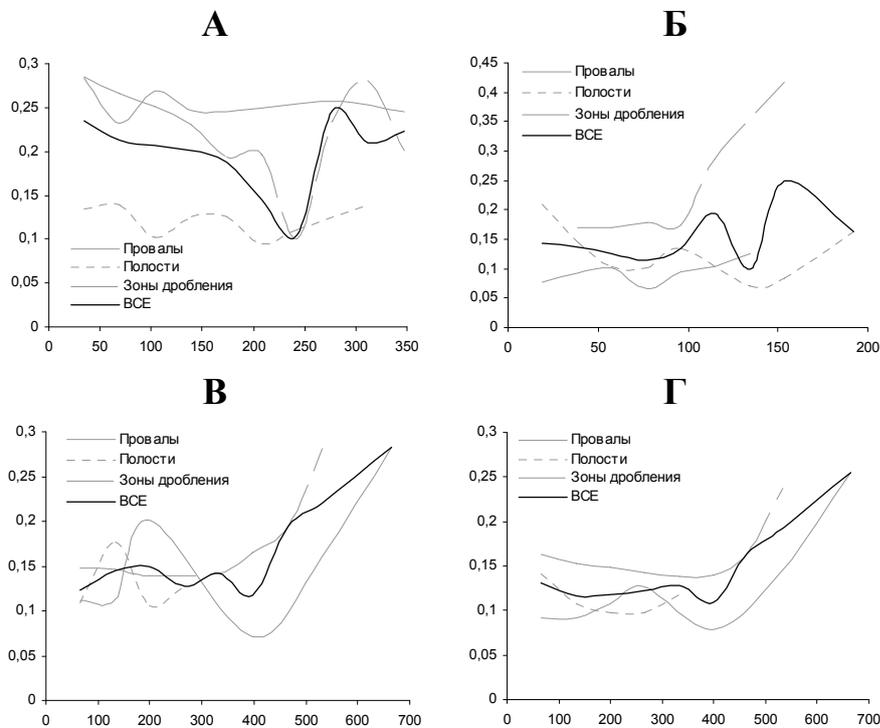


Рисунок 3.21. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удаленности от линейментов (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – пос. Октябрьский; Г – всех рассматриваемых участков

Физический смысл установленных распределений и зависимостей объясняется особенностями структурно-тектонических условий развития карста. Практически все полости закладываются в пределах зон, характеризующихся повышенной трещиноватостью коренных пород. Эти зоны на языке показателей линеamentной тектоники отражаются в повышенной линейной плотности и количестве пересечений линеamentов, приурочены к участкам развития большого количества мелких линеamentно-блоковых структур. Нередко дешифрируемые линеamentы практически идеально трассируют участки глубинных структурных нарушений, вследствие чего, примыкающие к ним площади также являются потенциально опасными в отношении развития подземных карстовых пустот.

3.4.3. Показатели геологической группы

Изучение опыта оценки карстоопасности показало, что карстологические условия территории в значительной степени предопределяются особенностями ее геологического строения. Развитие карста протекает в том случае, когда в массиве пород залегают карстующиеся отложения, а активность его проявления, выраженная в форме провалов, образующихся на поверхности земли, находится в прямой зависимости от глубины залегания карстующихся пород. В то же время особенности строения и сложения надкарстовой толщи пород оказывают ничуть не менее значимое влияние на развитие карстового процесса. В зависимости от конкретных условий влияние покровной толщи может усиливать или, наоборот, замедлять процесс провалообразования.

В результате изучения геологического строения исследуемых территорий было установлено, что в приповерхностной толще разреза в зависимости от возраста, преобладающей литологии пород и их состояния выделяется до 4 прослоев, прослеживающихся в региональном плане.

С поверхности в пределах всех исследуемых участков залегает слой рыхлых четвертичных отложений (Q) различного генезиса и состава. Под слоем четвертичных отложений встречаются слои карстово-обвальных рыхлых неоген-четвертичных отложений (N-Q) и, реже, карбонатно-терригенная толща, приуроченная к соликамскому горизонту уфимского яруса нижней Перми (P_{1uf}). Развитие этих слоев по площади и в разрезе носит спорадический характер, их мощность изменяется в широких пределах в зависимости от территории исследования. Четвертый слой представлен толщей карстующихся карбонатно-сульфатных и карбонатных отложений иренского и филипповского горизонтов кунгурского яруса нижней Перми (P_{1kg}). Различное сочетание этих отложений в разрезе в пределах исследуемых территорий не только

предопределяет характер карстоопасности, но и позволяет сформировать конкретный набор показателей геологического строения.

В основу генеральной типизации геологического строения исследуемых территорий положен стратиграфический принцип – особенности и порядок залегания разновозрастных отложений. В первом приближении всю толщу отложений, развитых на рассматриваемых участках, можно условно разделить на две части: 1) дисперсную, представленную глинистыми, реже песчаными отложениями с включениями крупнообломочного материала; 2) скальную – сложенную коренными породами. К первой части разреза относятся отложения четвертичного и неоген-четвертичного возрастов, ко второй – уфимские и кунгурские нижнепермские отложения.

В процессе расчленения разреза было выделено 2 типа геологического строения, в рамках которых выделяется до 6 подтипов. К первому типу разреза относятся участки, в пределах которых развита толща четвертичных отложений, ко второму – участки с ее отсутствием. В ходе дальнейшего расчленения 1 и 2 типов разреза было выделено, соответственно, 4 и 3 подтипа в рамках каждого из них, обозначенных строчными буквами русского алфавита. Подтипы характеризуются различным сочетанием рассматриваемых толщ (рисунок 3.22).

В ходе анализа площадного распространения выделенных типов геологического строения в пределах рассматриваемых территорий было установлено, что типы разреза 1в, 1г, 2б и 2в развиты крайне ограничено. Это связано с зачастую нарушенным залеганием отложений соликамского горизонта, степень разрушенности которых такова, что они нередко обособляются в качестве элювия четвертичных отложений, а иногда и в составе обвального-карстовой толщи. Таким образом, указанные типы разреза часто замещены типами 1б и 2а.

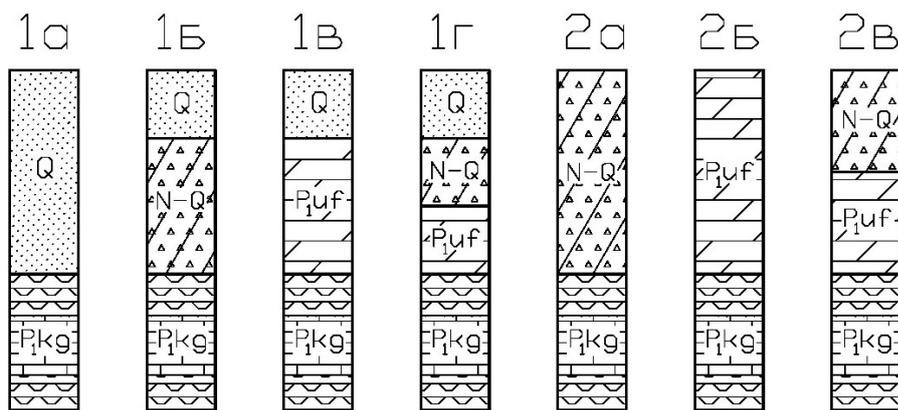


Рисунок 3.22. Типизация геологического строения в пределах исследуемых территорий (пояснение см. в тексте)

Отталкиваясь от проведенной типизации в пределах рассматриваемых участков выделяются следующие 3 из 4 исследуемых показателей природного строения геологической группы: 1) мощность четвертичных отложений; 2) мощность неоген-четвертичных обвального-карстовых отложений; 3) общая мощность отложений покровной толщи.

Согласно анализу геологического строения исследуемых площадок, отложения четвертичного возраста представлены дисперсными грунтами различного генезиса. Среди них преобладают аллювиальные, делювиальные и элювиальные образования и их разности, представленные глинистыми, реже песчаными грунтами с включениями крупнообломочного материала, реже – крупнообломочными грунтами с тонкодисперсным заполнителем.

Анализ влияния мощности четвертичных отложений на распределение карстопоявлений позволил в очередной раз подчеркнуть тенденцию к уменьшению их встречаемости с увеличением мощности толщи. Характер распределения изменяется в зависимости от территории исследования. В пределах г. Кунгур и пгт Полазна большинство карстовых форм тяготеет к средним и чуть менее среднего значениям мощности четвертичной толщи. При этом характер распределения на территории пгт Полазна имеет крайне неясную форму. Группирование большей части карстовых форм вблизи минимальных значений (менее 5 м) наблюдается в пределах Ординского района и пос. Октябрьский. В границах последнего выделяется второй пик встречаемости полостей в интервале мощности четвертичных отложений 14-20 м, а само распределение носит неоднородный характер. Обобщенное распределение в целом имеет форму близкую к логнормальному закону, несмотря на неясно выраженный максимум в распределении провалов (рисунок 3.23).

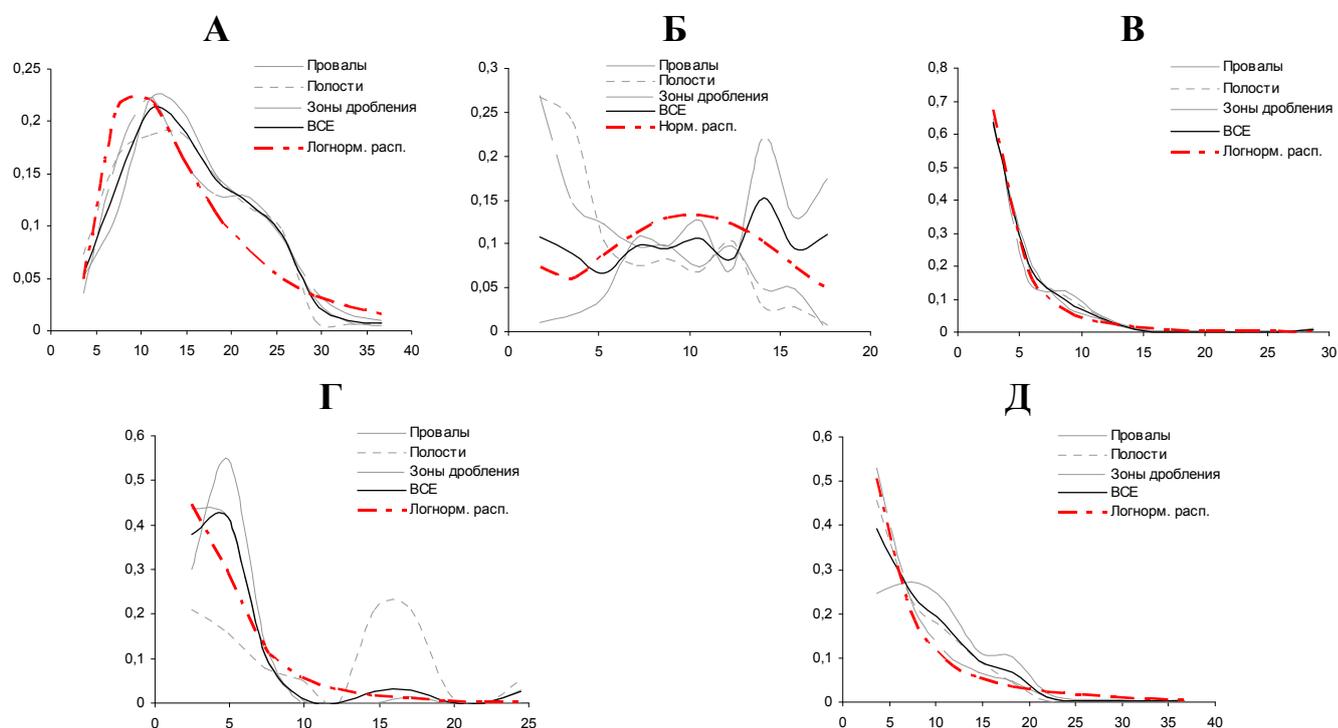


Рисунок 3.23. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений мощности толщи четвертичных отложений (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

Неоген-четвертичные отложения представлены так называемой «карстовой брекчией». Это обвально-карстовая толща дисперсных грунтов, образующаяся в результате обрушения подземных карстовых полостей и перемещения выше лежащих отложений вниз по разрезу с потерей их сплошности. Неоген-четвертичные отложения характеризуются «перемешанным» составом и общей разуплотненностью. В пределах исследуемых территорий они, как правило, сложены глинистыми отложениями со значительными включениями неокатанного крупнообломочного материала коренных пород различных размеров – от дресвы и щебня до отдельных глыб.

Установленное распределение карстовых форм в зависимости от мощности карстово-обвальных отложений также повторяет ранее отмеченные зависимости. В распределении поверхностных и подземных карстовых форм по мощности неоген-четвертичных отложений наблюдается определенная общность. Независимо от территории исследования практически все они приурочены к одним и тем же интервалам значений мощности обвально-карстовой толщи. Характерное отклонение наблюдается только в пределах Октябрьского поселения в отношении карстовых полостей. Общее распределение карстопроявлений, построенное по всем исследуемым территориям, носит промежуточный характер между логнормальным и нормальным видом, а максимумы их развития приурочены к участкам с мощностью неоген-четвертичных отложений 5-20 м (рисунок 3.24).

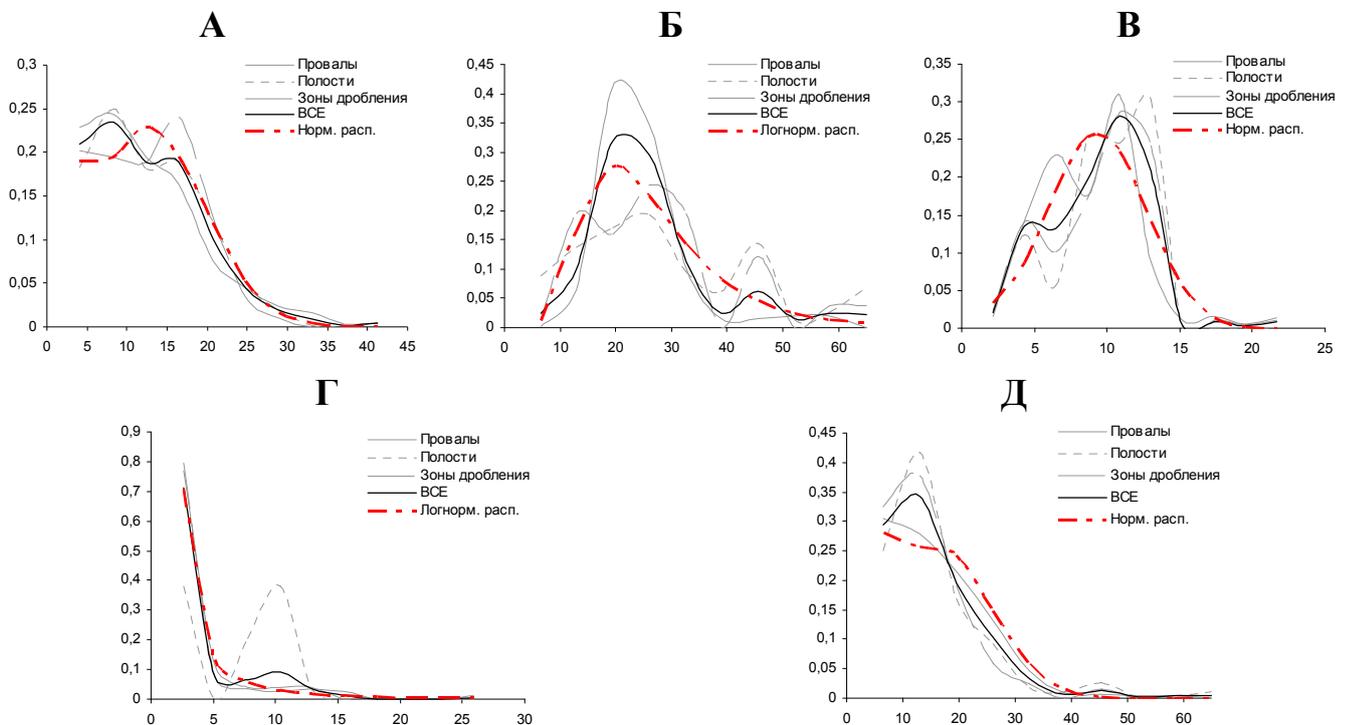


Рисунок 3.24. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений мощности толщи неоген-четвертичных обвально-карстовых отложений (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

Распределение карстовых форм по мощности покровной толщи отложений носит некоторый промежуточный характер, между рассмотренными распределениями карстопроявлений по мощностям четвертичной и неоген-четвертичной толщ. На территории г. Кунгур и пос. Октябрьский общее распределение тяготеет к средним значениям и подчиняется нормальному закону. Неоднородность, зафиксированная по полостям в пределах пос. Октябрьский, в данном случае проявляется более четко. В целом по всем рассматриваемым карстовым районам распределение имеет логнормальный характер, несмотря на то, что в интервале значений мощностей 30-40 м проявляется локальная неоднородность (рисунок 3.25).

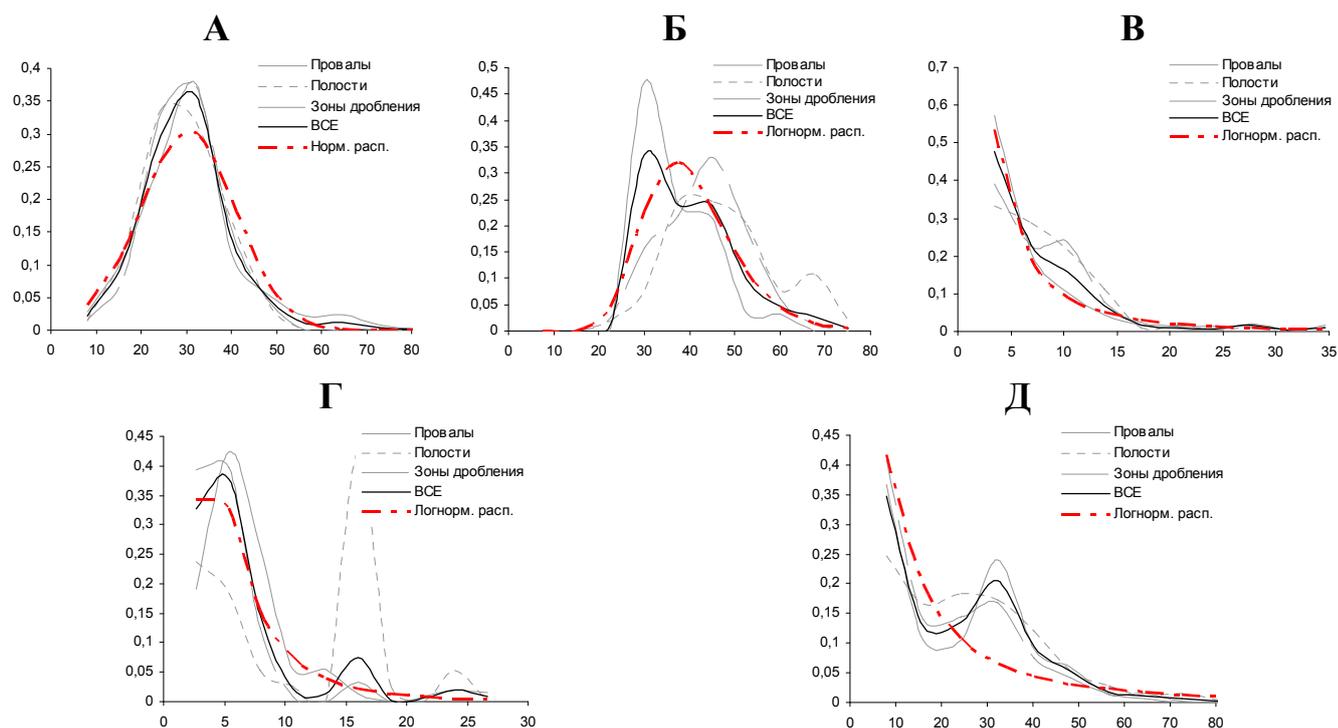


Рисунок 3.25. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений мощности покровной толщи отложений (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

В результате анализа зависимости морфометрических параметров карстовых форм от исследуемых показателей геологического строения установлен ее прямой характер для каждого из них. В пределах практически всех исследуемых территорий зафиксировано увеличение средних диаметров провалов и высот подземных карстовых форм с ростом значений показателей геологического строения. Исключение составляет лишь тренд зависимости морфометрических характеристик от значений мощности четвертичной толщи в пределах пгт Полазна, где она имеет обратный характер (рисунки 3.26-3.28).

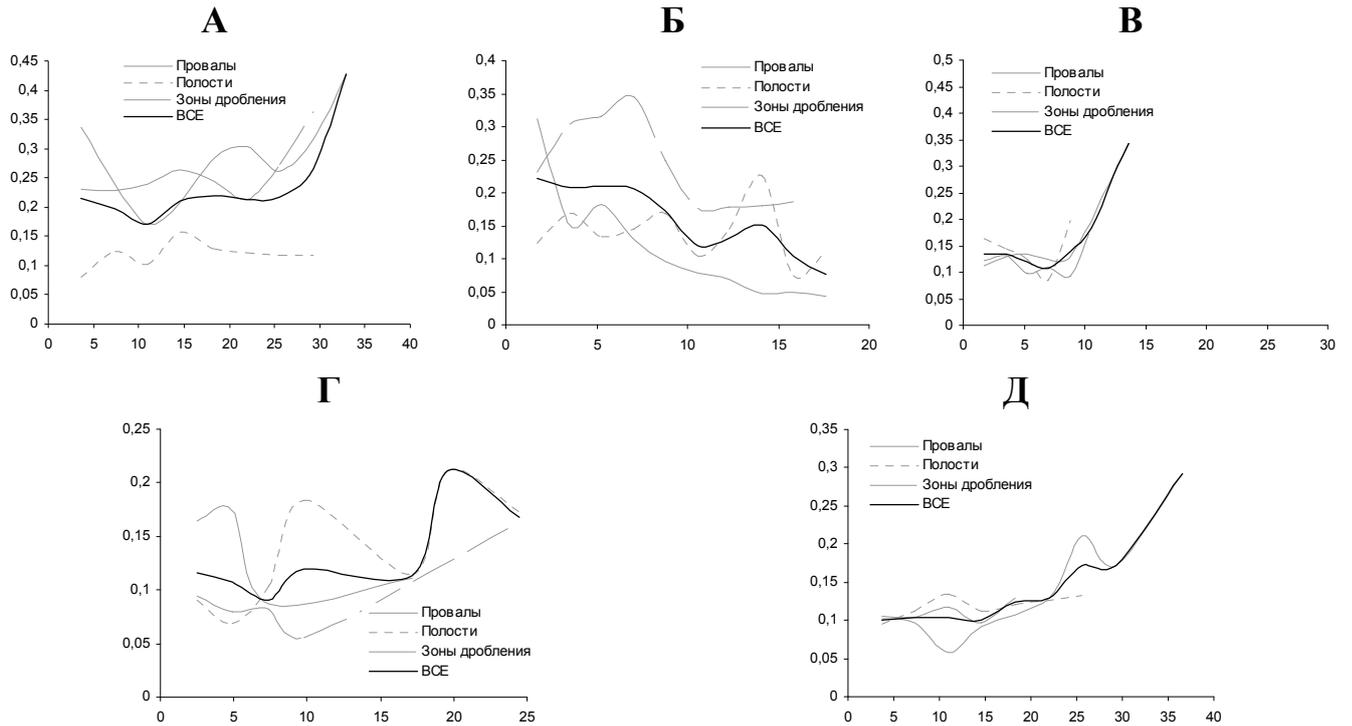


Рисунок 3.26. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений мощности толщи четвертичных отложений (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

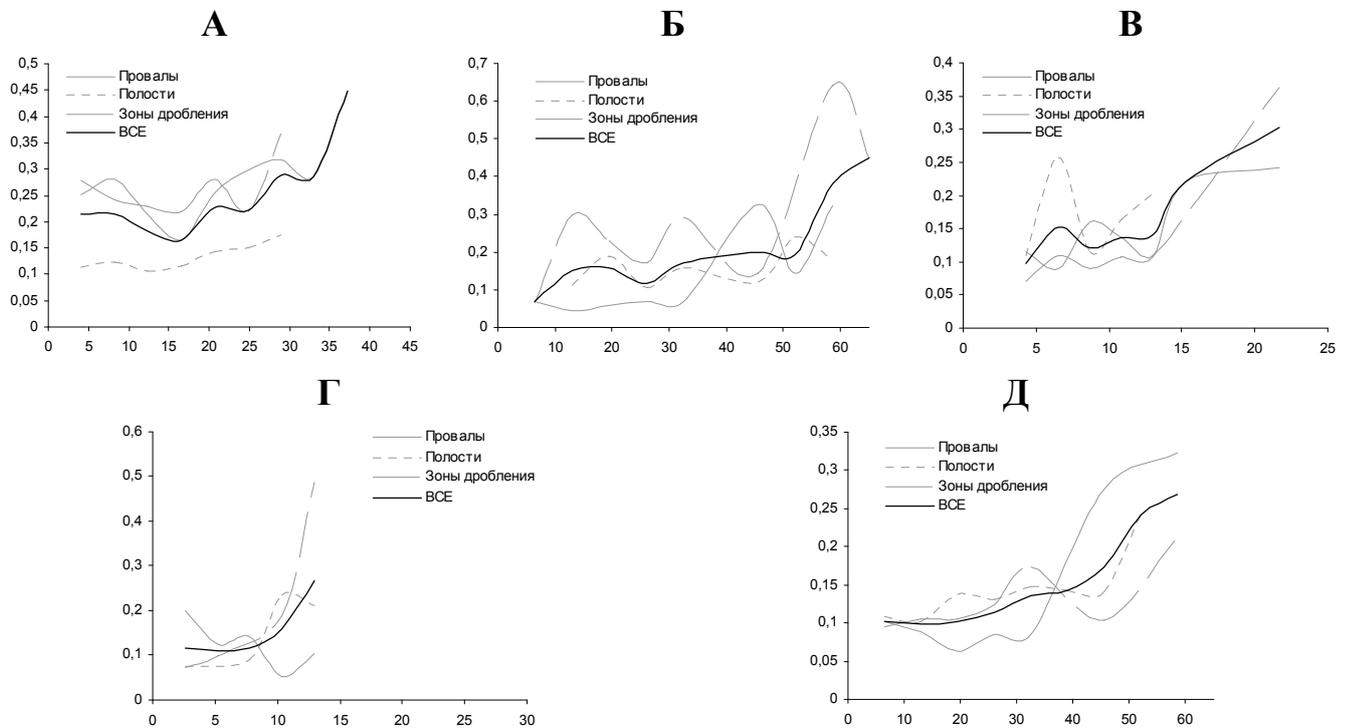


Рисунок 3.27. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений мощности толщи неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

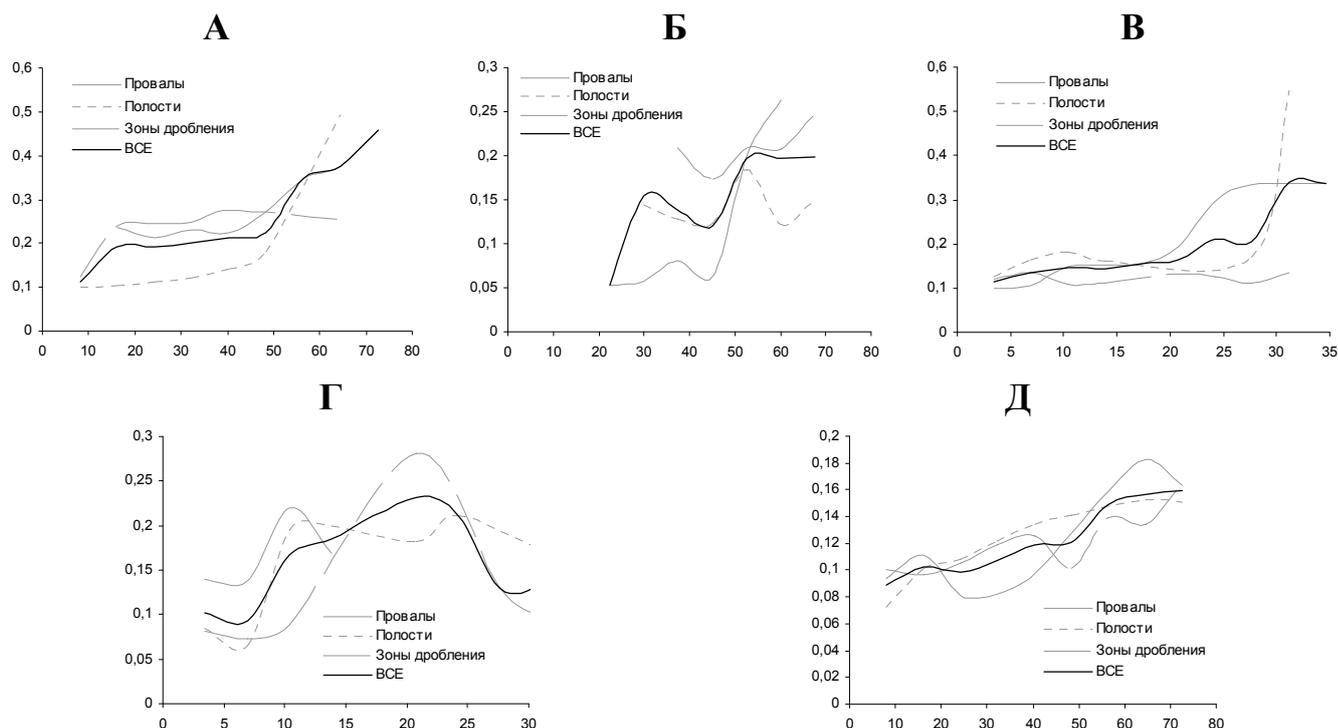


Рисунок 3.28. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений мощности покровной толщи отложений (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

3.4.4. Показатели гидрогеологической группы

Исследование влияния гидрогеологических условий на интенсивность развития карста на рассматриваемых участках осуществляется посредством анализа трех показателей, два из которых характеризуют положение уровня подземных вод, приуроченных к различным горизонтам, а один – химические особенности подземной гидросферы.

Анализ урванного режима сводится к исследованию среднегодовой глубины установления грунтовых и карстовых вод, фиксируемой по скважинам, шурфам и прочим горным выработкам. Исследование среднегодовой урванной поверхности подземных вод является вынужденной необходимостью, объясняемой рядом причин. Среди них особо выделяются такие, как количественная ограниченность совокупности данных о положении подземных вод в периоды летней и зимней межени, весенне-осенних половодий и паводков, слабая сеть площадной изученности гидрогеологических условий. Исследование гидрохимических особенностей подземной гидросферы произведено по анализу средней минерализации подземных вод. При этом, ввиду выше названных причин, в анализе участвовали как пробы, отобранные из грунтовых, так и трещинно-карстовых водоносных горизонтов.

Большинство подземных и поверхностных карстовых форм на территории г. Кунгур локализовано на участках установления грунтовых вод на глубинах 4-8 м, а их общее распределение в пределах города с высокой точностью описывается логнормальным законом. Распределения карстовых форм в зависимости от глубины установления грунтовых вод в пределах пгт Полазна и исследуемого участка трассы газопровода в Ординском районе носят крайне неоднородный характер. Так, на территории Ординского района только в распределении провалов наблюдается два отчетливых максимума, а в общем распределении всех карстовых форм прослеживается уже три ясно различимых максимума. Однако обобщенное распределение всех карстовых форм по показателю глубины установления грунтовых вод в границах всех анализируемым закарстованных участков характеризуется однородным видом с максимумом развития карстопроявлений, приуроченным к интервалу глубин 3-9 м. В целом, полученная закономерность хорошо согласуется с опытными и теоретическими предположениями исследований прошлых лет (рисунок 3.29).

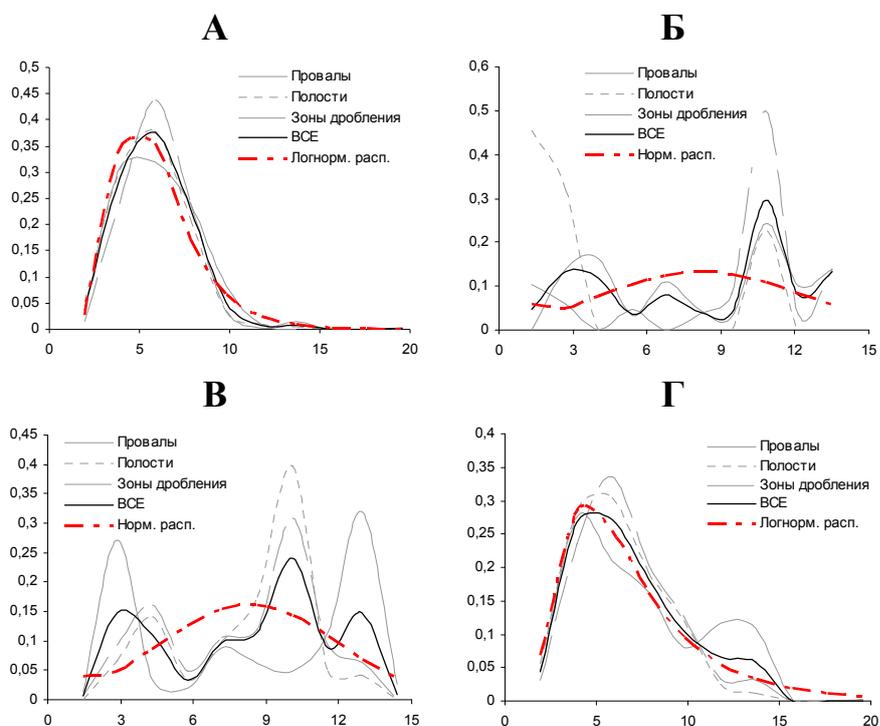


Рисунок 3.29. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений глубины установления грунтовых вод (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – всех рассматриваемых участков

Интенсивность образования карстовых форм в зависимости от положения трещинно-карстовых вод прослеживается менее четко. В пределах 3 исследуемых территорий большая часть карстопроявлений приурочена к глубинам установления карстовых вод, превышающим средние значения по району. Данная тенденция нарушается только на исследуемом полигоне участка трассы в Ординском районе Пермского края. Кроме этого в распределении провалов,

полостей и зон дробления отсутствует гармоника и их пики часто приурочены к различным интервалам глубин установления трещинно-карстовых вод. На территории г. Кунгур отмечается локальная неоднородность в распределении карстовых форм. Большинство из них здесь сформировалось в интервале глубин залегания карстового водоносного горизонта 30-70 м, причем в рамках этого интервала выделяется два отдельных максимума их встречаемости – 25-35 м и 60-70 м. Отмеченные несовпадения распределений по отдельно взятым карстовым формам проявляются и на обобщающих кривых. Однако примечательным является тот факт, что итоговое распределение, полученное по всем карстовым формам и в пределах всех рассматриваемых территорий, хотя и имеет неровный характер (на дифференциальной кривой выделяются три локальных максимума), но при этом полностью меняет свою направленность. Анализ этой кривой говорит о том, что большая часть карстопроявлений формируется в условиях неглубокого положения карстовых вод, что в целом согласуется с результатами множества натуральных наблюдений (рисунок 3.30).

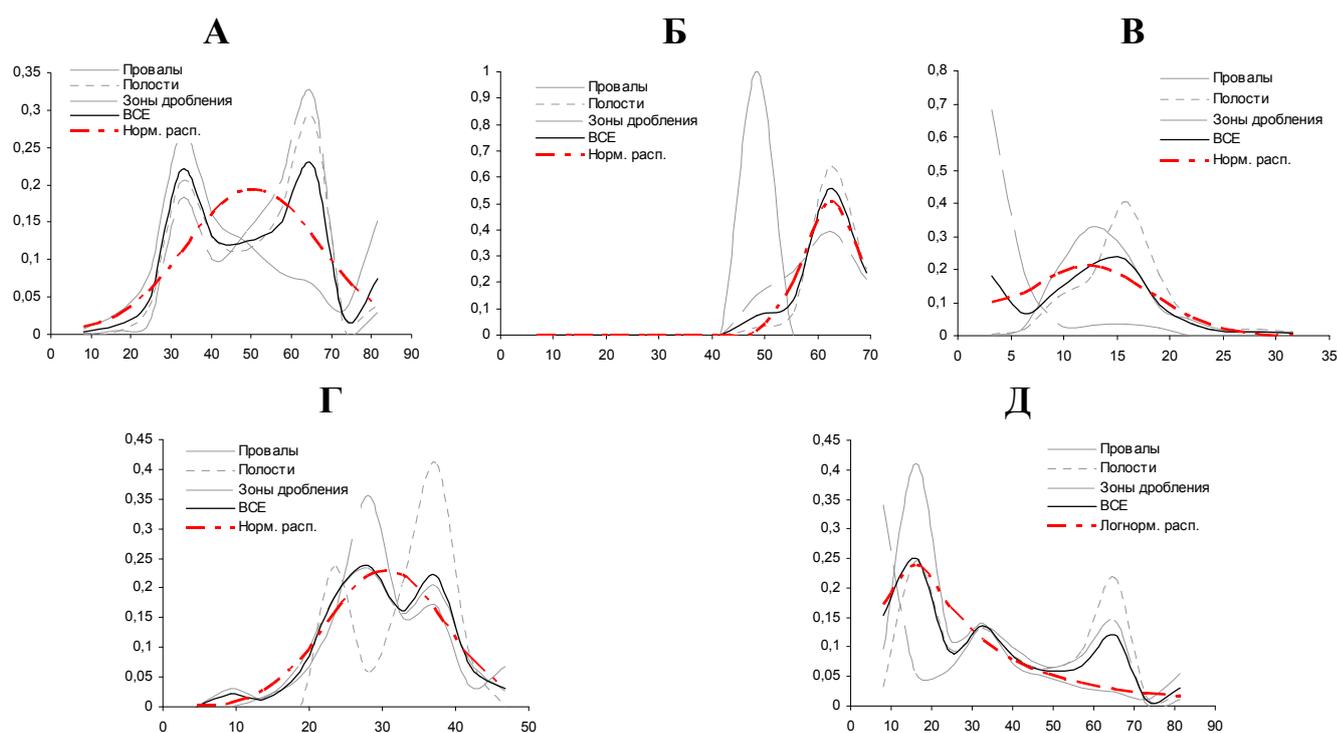


Рисунок 3.30. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений глубины установления трещинно-карстовых вод (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

Распределения карстопроявлений в зависимости от минерализации подземных вод подчеркивают одно из положений развития карста, согласно которому, его интенсивность тем выше, чем меньше природные воды насыщены различными химическими элементами и их соединениями. На всех рассматриваемых территориях абсолютное большинство карстовых форм

образовалось на участках с минерализацией подземных вод, не превышающей 2-3 г/дм³. С дальнейшим увеличением минерализации их количество резко сокращается. Включение в единый анализ как водных проб, отобранных из грунтовых водоносных горизонтов, так и трещинно-карстовых вод, естественно, несколько нарушило общий характер и целостность распределений. Например, ясно выраженные максимумы встречаемости карстопроявлений при небольших значениях минерализации во многом обусловлены влиянием грунтовых вод, минерализация которых, как правило, на несколько порядков меньше, чем у подземных вод, приуроченных к карстующимся отложениям. Низкая общая минерализация подземных вод, приуроченных к обвально-карстовой толще и отложениям филипповского горизонта, отмечается на территории пос. Октябрьский. По данным химических анализов этих вод их минерализация в редких случаях превышает 1,0 г/дм³. Для сравнения сумма всех ионов трещинно-карстовых вод, приуроченных к иренским гипсам и ангидритам на территориях г. Кунгур, пгт Полазна и Ординского района в целом в некоторых случаях достигает 15-20 г/дм³, в среднем составляя 3-6 г/дм³. Отмеченная «пропасть» между минерализацией грунтовых и карстовых вод, по-видимому, оказывает решающее влияние, вследствие которого наблюдаемые общие эмпирические распределения карстовых форм резко отличаются от теоретических аналогов, в области пониженных значений минерализации (рисунок 3.31).

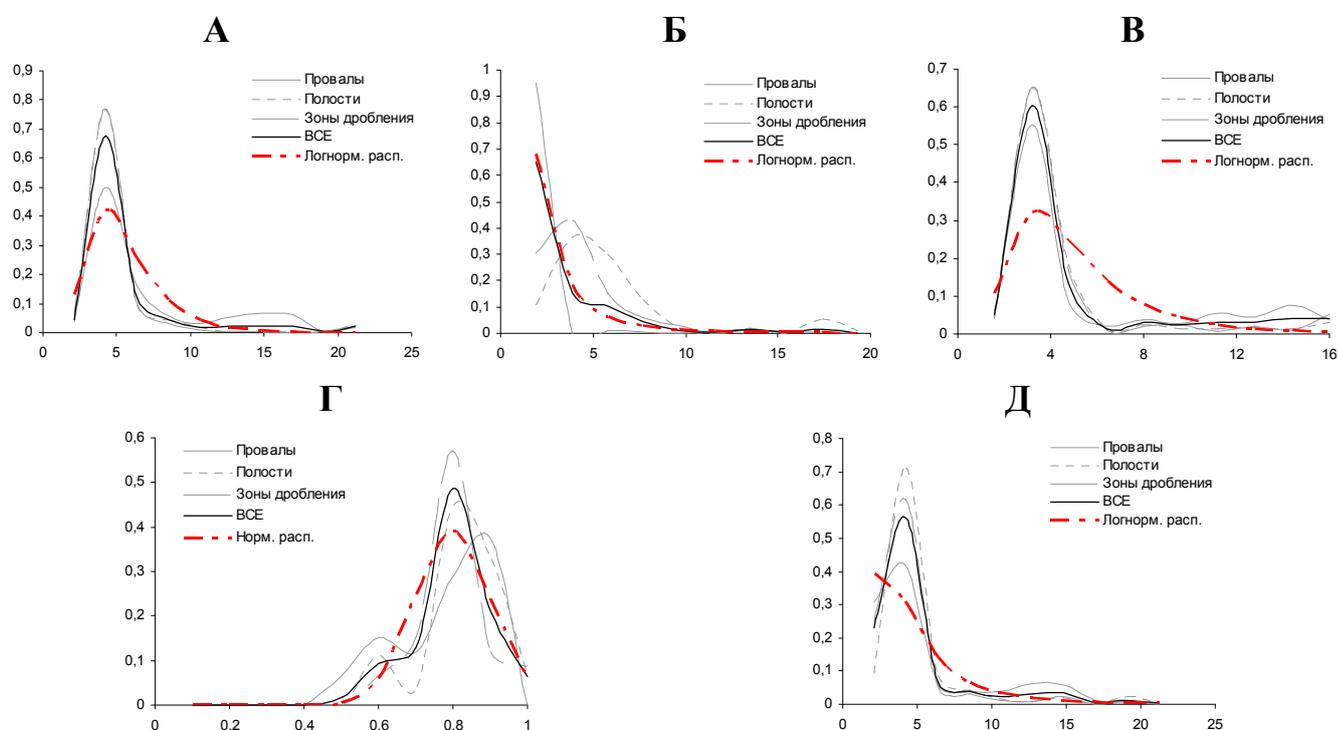


Рисунок 3.31. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений минерализации грунтовых вод (ось X), г/дм³, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

Анализ взаимосвязи между морфометрией карстовых форм и положениями уровней грунтовых и трещинно-карстовых вод просматривает незначительный повышающий тренд, причем характер тренда в случае грунтовых вод крайне неоднозначный. Например, на территории пгт Полазна анализ оказался вовсе безрезультатным. Здесь зафиксировано уменьшение средних диаметров провалов и повышение мощности зон дробления с ростом глубинного положения грунтовых вод. На территории г. Кунгур тренд проявляется достаточно уверенно только в узком интервале глубин (5-10 м), а в Ординском районе существенный скачок средних диаметров и высот карстовых форм отмечается при глубоком положении уровня грунтовых вод (более 12 м). В целом, аналогичный, но в то же время более устойчивый характер направленности установлен в отношении положения уровня карстовых вод (рисунки 3.32, 3.33).

Повышение минерализации способствует формированию более крупных провалов и полостей (рисунок 3.34). Эта закономерность особенно ярко прослеживается на территориях г. Кунгур и пос. Октябрьский. Более пологий тренд установлен при исследованиях на территории участка трассы газопровода. В границах пгт Полазна и его окрестностей тренд также пологий, с характерным скачком в сторону увеличения мощностей зон дробления, отмеченным при величине минерализации 8-12 г/дм³.

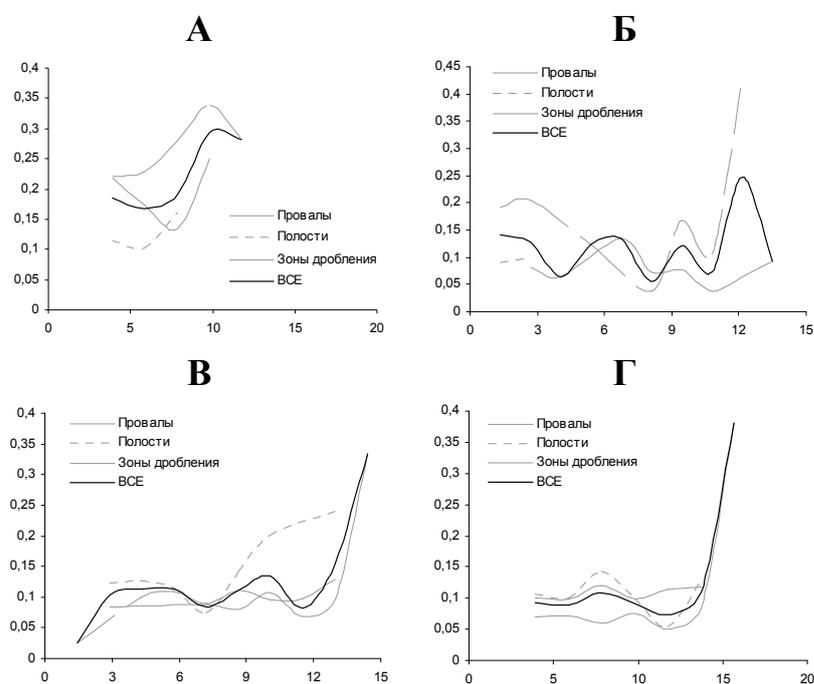


Рисунок 3.32. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений глубины установления грунтовых вод (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – всех рассматриваемых участков

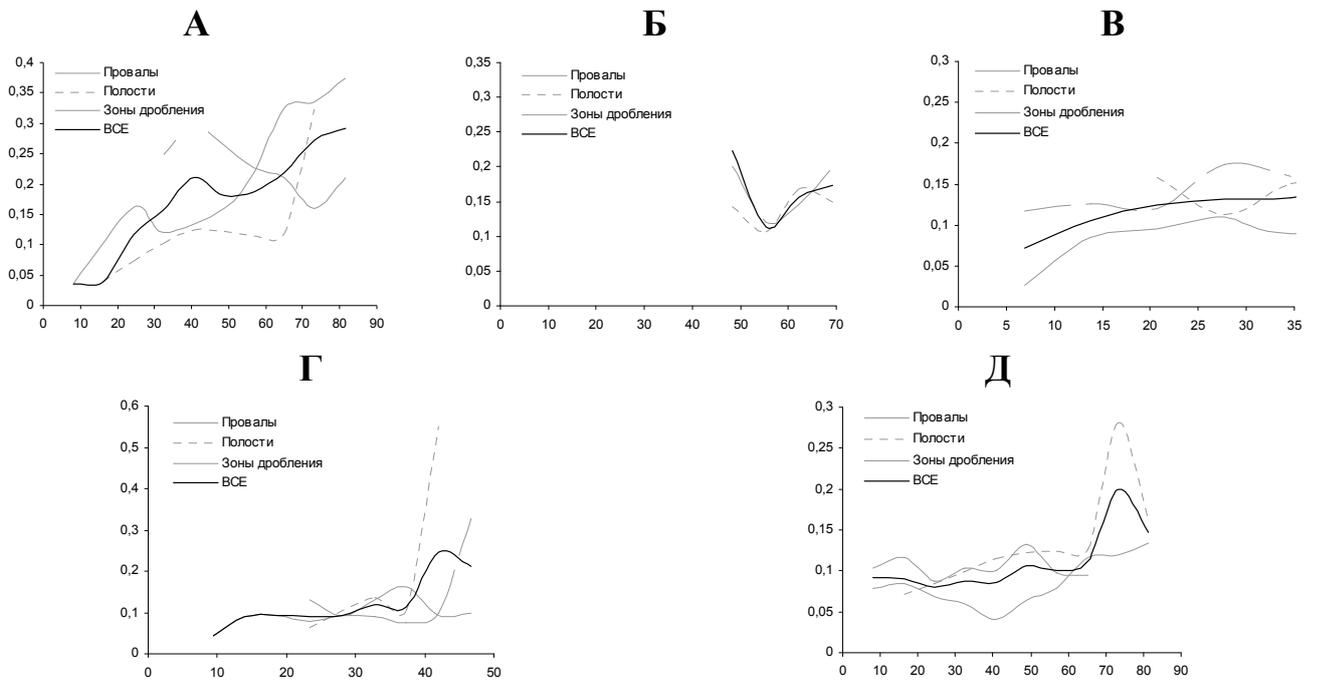


Рисунок 3.33. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений глубины установления трещинно-карстовых вод (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

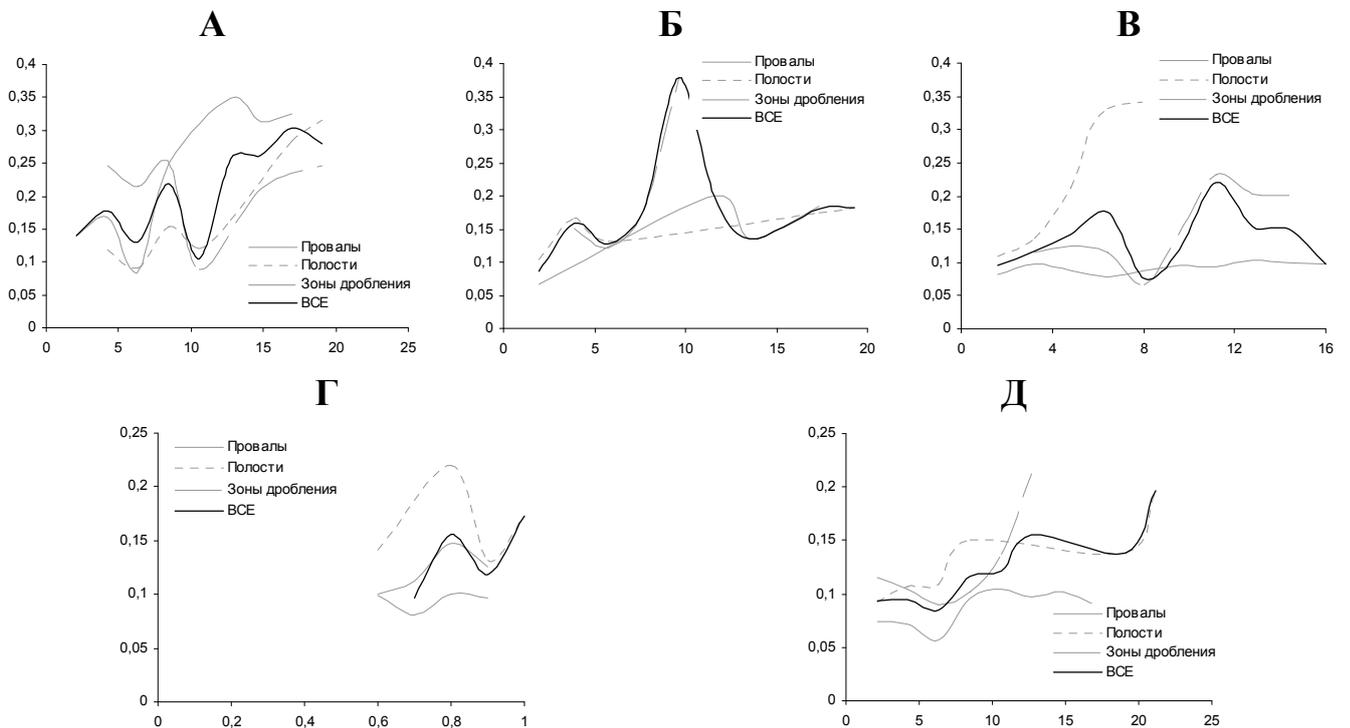


Рисунок 3.34. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений минерализации подземных вод (ось X), г/дм³, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

3.4.5. Показатели геоморфологической группы

Согласно построенным цифровым моделям рельефа, абсолютные отметки в пределах исследуемых территорий варьируют от 91,7 м в пгт Полазна до 387,6 м в пос. Октябрьский. Максимальные зафиксированные уклоны рельефа составляют $41,2^\circ$ в пределах территории г. Кунгур и $82,0^\circ$ - $85,8^\circ$ в пределах остальных исследуемых районов. В среднем уклон рельефа поверхности земли равен $1,7^\circ$ - $2,8^\circ$. Характеристика превышения рельефа над средним уровнем рек определена относительно главного водотока в пределах исследуемых территорий. Максимальные превышения и средние уровни рек приведены в таблице 3.12.

Уклон водосбора, выраженный в форме тангенса угла наклона осредненной поверхности рельефа водосборной площади к плоскости, сформированной уровнем рек, согласно моделированию изменяется от значений близких к 0 до 26,8, в среднем составляя 0,05-0,15. Максимальные значения уклона водосбора зафиксированы у высоких берегов Камского водохранилища в пределах пгт Полазна в местах выхода коренных гипсов и ангидритов на дневную поверхность.

Таблица 3.12. Средние уровни рек и максимальные превышения рельефа в пределах исследуемых территорий

Территория	Средний уровень рек в пределах исследуемой территории, м	Максимальное превышение рельефа над средним уровнем рек, м
г. Кунгур	111,0	95,0
пгт Полазна	91,7	136,8
Ординский район	125,0	162,5
пос. Октябрьский	280,0	107,9

Анализ распределения карстовых форм по значениям показателей геоморфологического строения показал, что распределения рассматриваемых поверхностных и подземных карстовых форм практически всегда повторяют друг друга. Другими словами их максимумы и минимумы приурочены к одним и тем же, реже – смежным, интервалам значений геоморфологических показателей (рисунки 3.35-3.38).

Однородные распределения, как в рамках конкретных территорий исследования, так и при их интегральном рассмотрении с отклонением в сторону меньших значений получены для показателей уклона рельефа и уклона водосбора. Теоретические кривые плотности распределения этих двух показателей, построенные по данным распределения всех карстовых форм, практически один в один повторяют эмпирические аналоги. Небольшие отклонения теоретических распределений от эмпирических наблюдаются на территории пос. Октябрьский (по обоим показателям) и в пределах г. Кунгур (по показателю уклона водосбора).

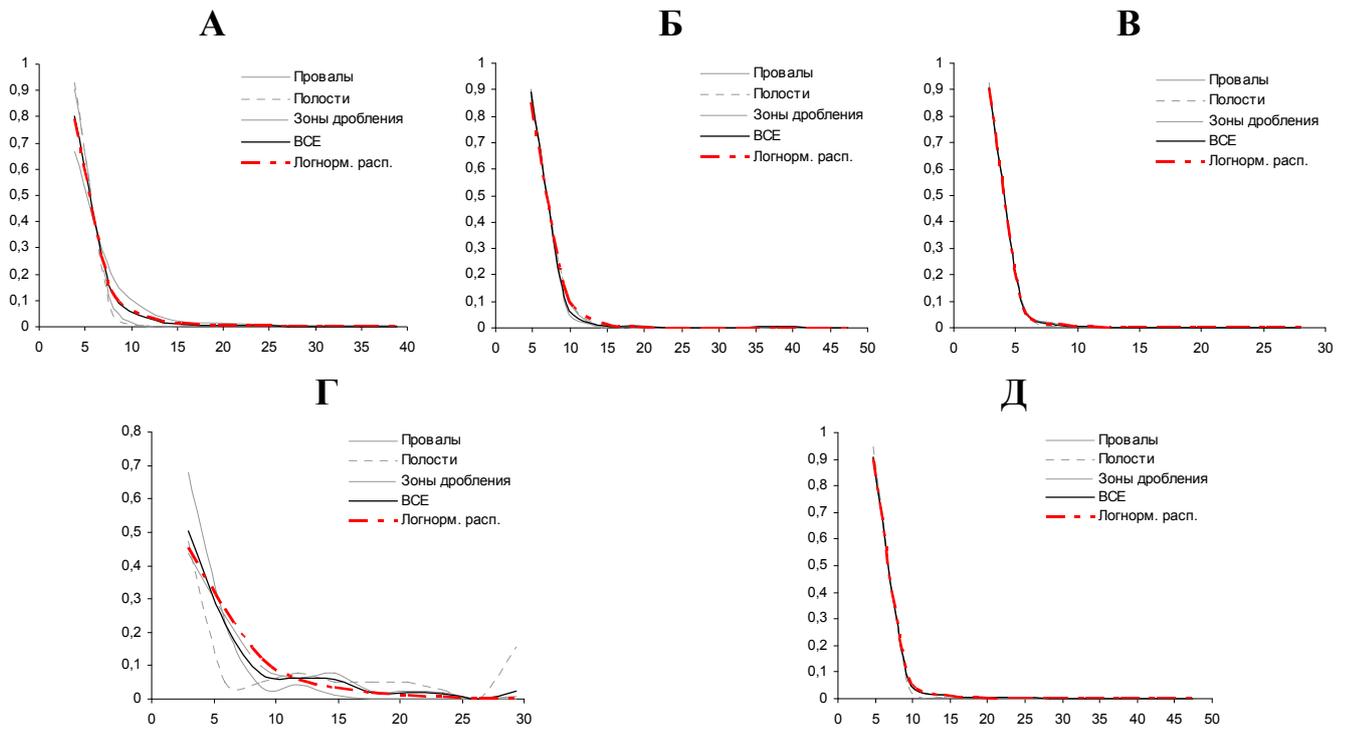


Рисунок 3.35. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений уклона рельефа (ось X), градус, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

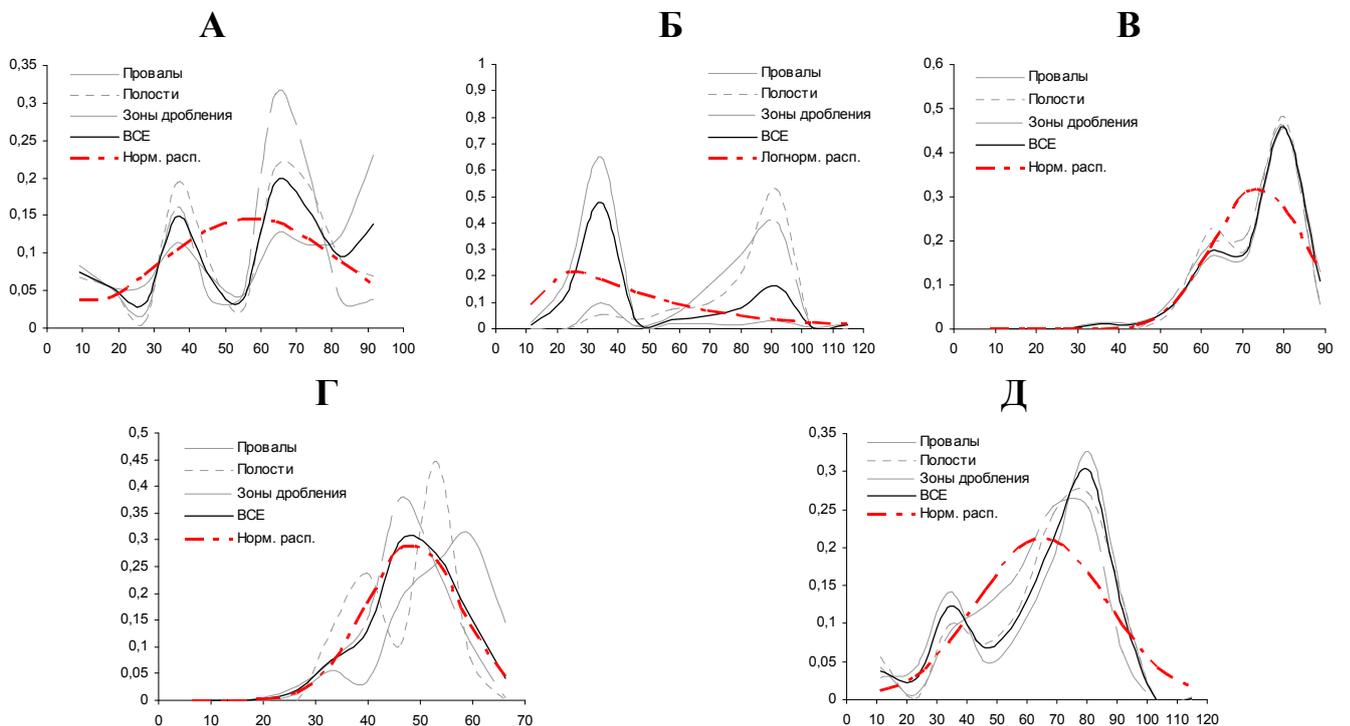


Рисунок 3.36. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений превышения рельефа над средним уровнем рек (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

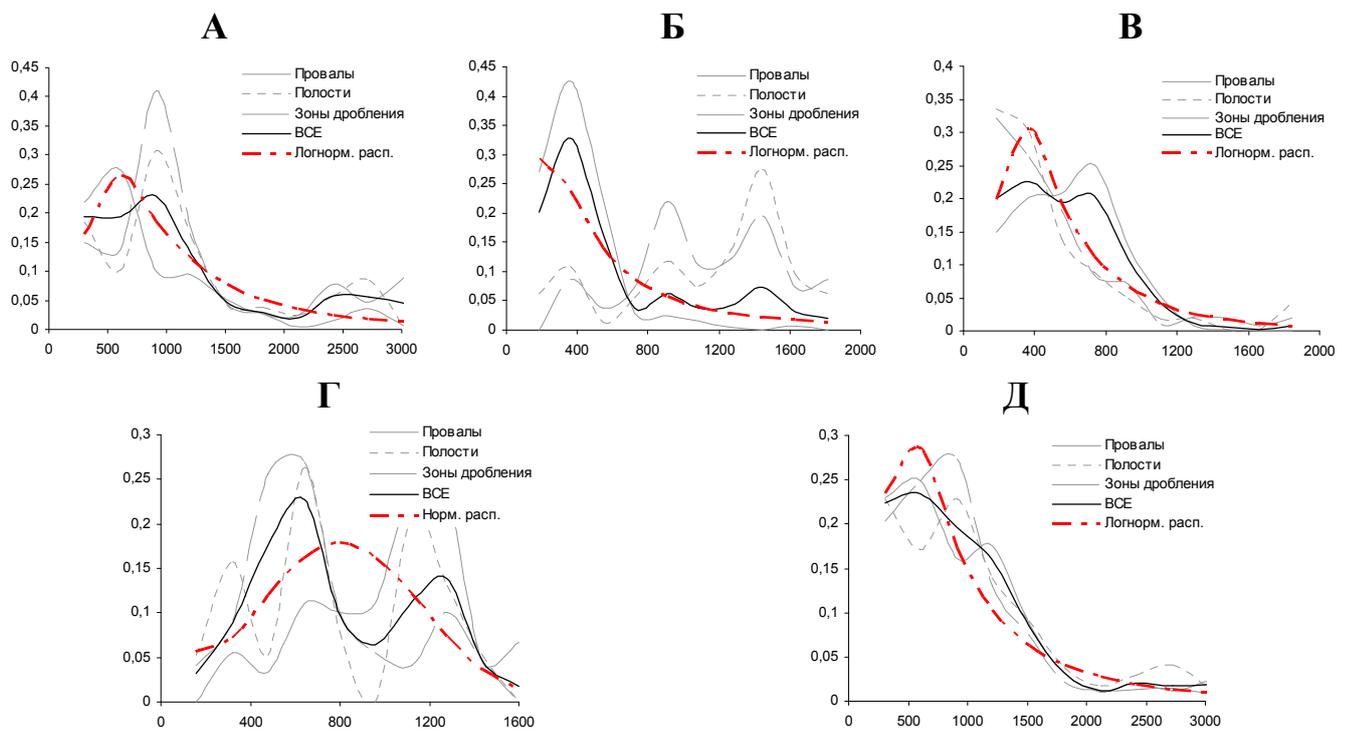


Рисунок 3.37. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удаленности от рек (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

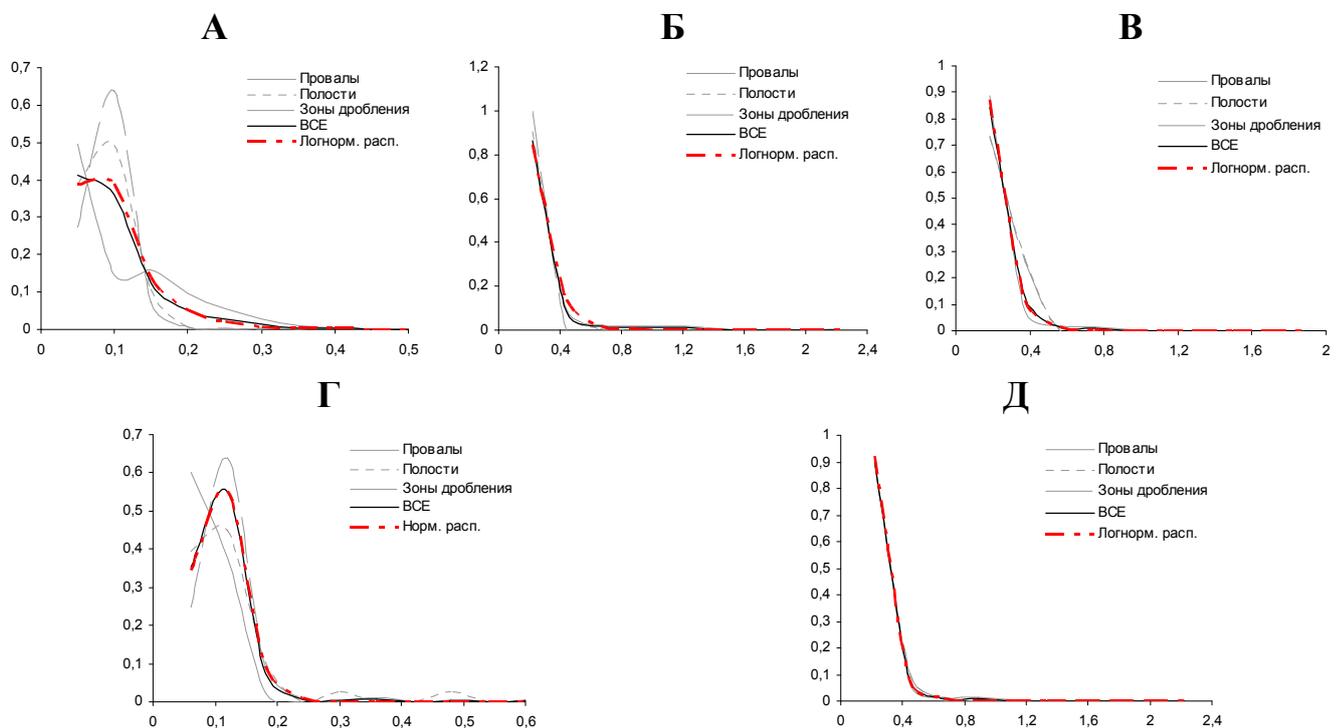


Рисунок 3.38. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений уклона водосбора (ось X), д.е., в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

Несколько худшая картина в распределении карстовых форм наблюдается для показателей превышения рельефа над средним уровнем рек и удаленности от речной сети. Так, на

территории г. Кунгур и пгт Полазна распределения карстовых форм по значениям превышения рельефа носят неоднородный бимодальный характер, т.е. имеют два максимума. Аналогичная картина наблюдается на территории пгт Полазна и пос. Октябрьский в случае показателя удаленности от речной сети. Характерной чертой распределений карстовых форм по значениям показателя превышения рельефа над средним уровнем рек является отклонение максимума встречаемости карстовых форм в сторону больших значений показателя, а на территории исследуемого участка газопровода в Ординском районе и вовсе – к его максимальным значениям. Однако при анализе интегральных распределений карстовых форм в пределах всех исследуемых территорий отмеченные неоднородности распределений нивелируются. Так, для показателя превышения рельефа отмечается небольшой локальный максимум развития карстовых форм при относительно небольших его значениях (30-40 м), а в случае удаленности от речной сети крайне малая неоднородность отмечена только в распределении зон дробления.

Прогнозные теоретические кривые распределения всех карстовых форм в пределах всех исследуемых территорий по показателям превышения рельефа над средним уровнем рек и удаленности от речной сети в целом повторяют эмпирические распределения. Хорошая сходимость распределений отмечена для удаленности от речной сети и удовлетворительная для показателя превышения рельефа, что позволяет рекомендовать их, наряду с показателями уклона рельефа и водосбора, при прогнозировании образования новых карстовых форм. По-видимому, расширение географии исследования и привлечение в анализ аналогичных сведений по другим закарстованным территориям позволит установить более точные распределения карстовых форм по этим двум показателям и, как следствие, подобрать более точные параметры теоретических законов распределения, описывающих их.

Взаимосвязи исследуемых морфометрических параметров карстовых форм от значений рассматриваемых показателей геоморфологического строения установлены по результатам тренд-анализа. Обратный тренд отмечен для показателей уклона рельефа поверхности и уклона водосбора, прямой, соответственно, для превышения рельефа над средним уровнем рек и удаленности от речной сети (рисунки 3.39-3.42).

Заметим, что направленность зависимостей, установленных как по провалам и воронкам, так и по полостям и зонам дробления практически всегда совпадает. При этом характер зависимости наиболее четко выражается при анализе морфометрии поверхностных карстовых форм. В редких случаях тренд изменчивости высот полостей является обратным по отношению к другим исследуемым карстовым формам и наиболее отчетливо проявляется на участке трассы магистрального газопровода в Ординском районе практически для всех исследуемых показателей геоморфологического строения.

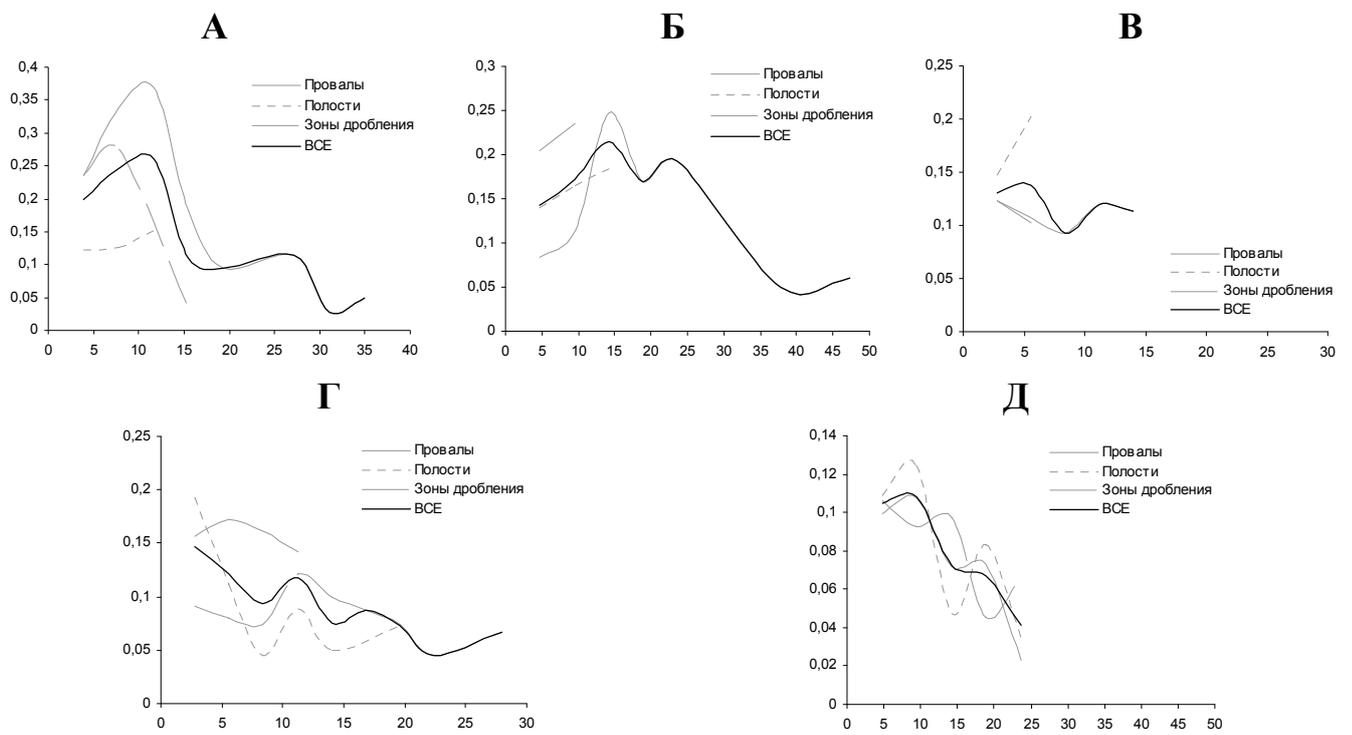


Рисунок 3.39. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений уклона рельефа (ось X), градус, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

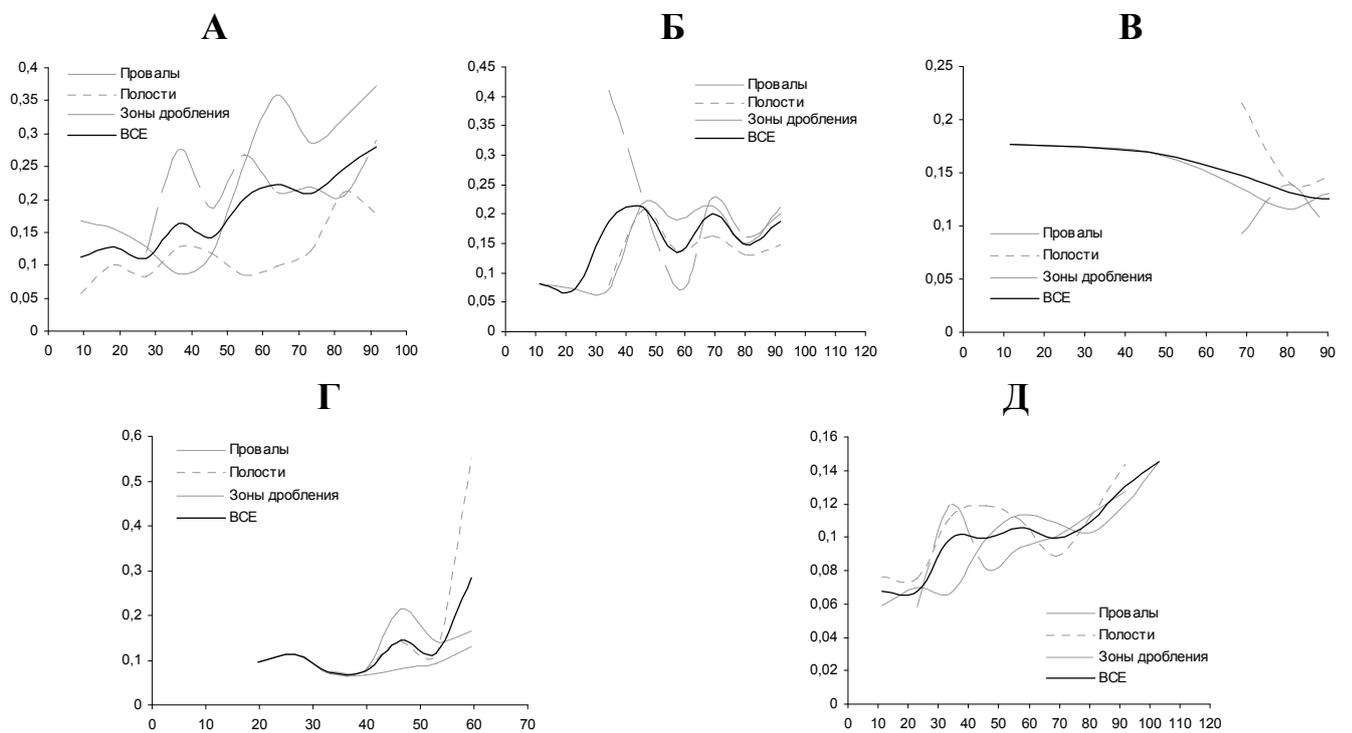


Рисунок 3.40. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений превышения рельефа над средним уровнем рек (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

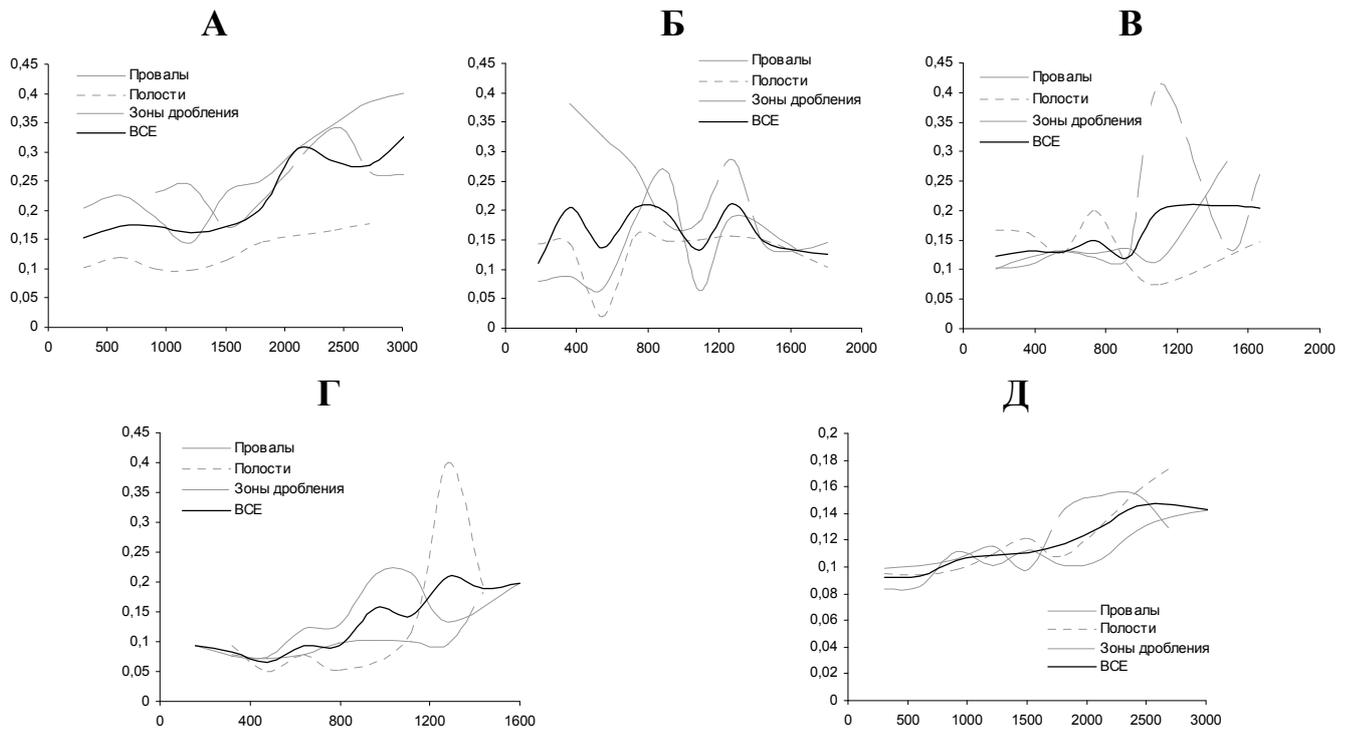


Рисунок 3.41. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удаленности от рек (ось X), м, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

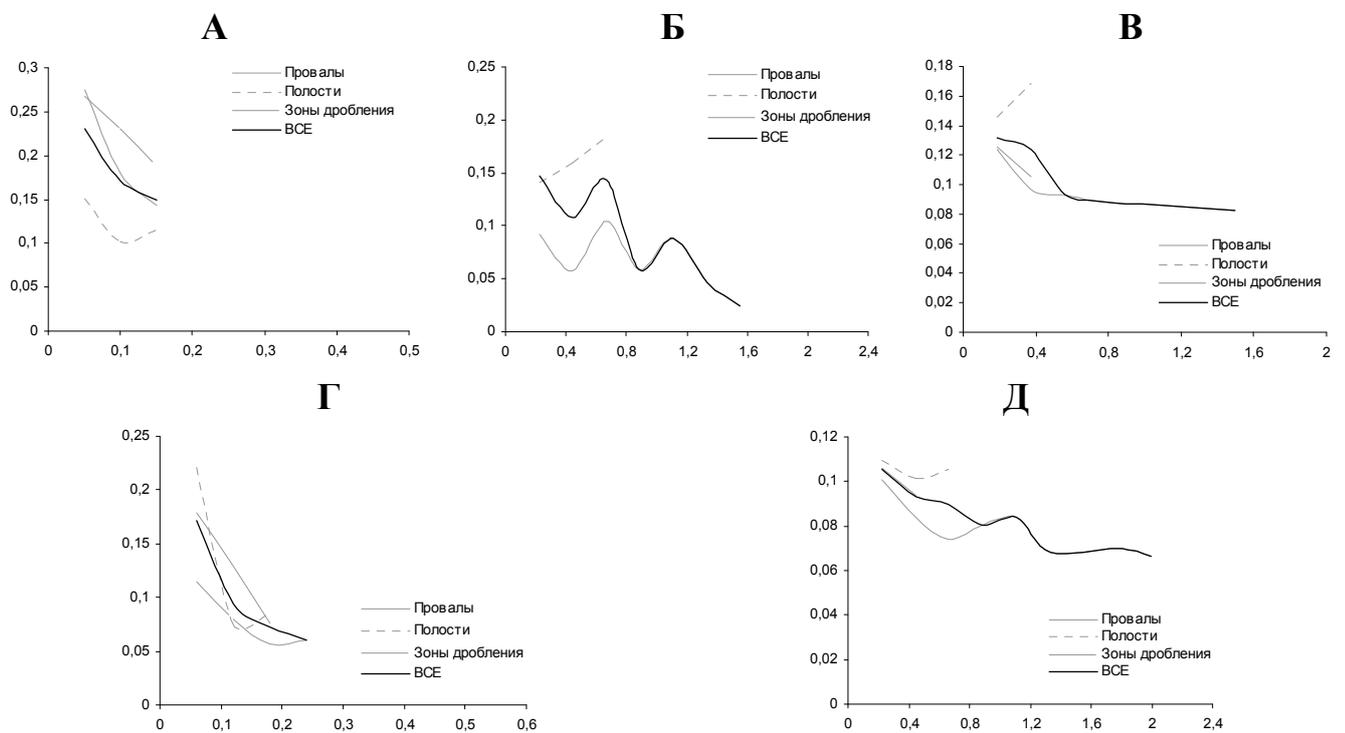


Рисунок 3.42. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений уклона водосбора (ось X), д.е., в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

3.4.6. Показатели инженерно-геологической группы

Ранее мы отмечали, что объективным выражением инженерно-геологических особенностей строения толщи покровных отложений могут служить основные физико-механические свойства грунтов, к которым относятся модуль общей деформации, угол внутреннего трения и удельное сцепление.

В анализе использованы данные лабораторных исследований проб грунтов, отобранных в разные годы из шурфов и скважин, пройденных в пределах рассматриваемых территорий разными организациями. Основным методом установления механических характеристик послужили данные компрессионных и сдвиговых испытаний. Истинные значения модуля общей деформации определялись с учетом коэффициента m_k , рекомендуемого к применению [7]. После систематизации всех проб в рамках единой базы данных в пределах территорий исследования отмечено порядка 1500 проб грунтов с полностью или частично установленными физико-механическими характеристиками, приуроченных к 400-500 скважинам.

В виду общей слаборазвитой и неравномерной сети изученности грунтов на рассматриваемых территориях сдвиговыми и компрессионными испытаниями, в настоящих исследованиях помимо лабораторных значений механических характеристик использованы также их табличные значения, определенные согласно приложению Г СП [17] с учетом значений физических свойств и номенклатуры грунтов. Табличные значения механических характеристик определены для каждой отдельно взятой пробы, характеризующейся полным набором физических характеристик. Всего таких проб в анализе оказалось порядка 3300 штук, а количество скважин, из которых осуществлялся отбор, приближается к 1000.

Точность оценки механических характеристик по таблицам СП [17] оценена путем сопоставления их значений с результатами прямых лабораторных испытаний двумя способами. Первый способ заключался в оценке корреляционных связей между ними в результате анализа каждой из отдельно взятых проб. Второй способ ориентирован на определение связи между табличными и лабораторными значениями механических свойств грунтов в рамках скважин в результате осреднения значений по отобранным из них пробам. Результаты корреляционного анализа приведены в таблице 3.13. Как видно, между значениями механических характеристик, определенных разными способами, наблюдается весьма устойчивая прямая корреляция, а после удаления из общей совокупности наиболее отклоняющихся пар значений связь между ними становится весьма тесной с коэффициентом линейной корреляции, превышающим 0,7 (рисунок 3.43). Наличие столь тесных связей позволяет использовать табличные значения механических характеристик наравне с лабораторными значениями в ходе карстологических исследований.

Таблица 3.13. Взаимосвязь лабораторных и табличных значений основных механических свойств дисперсных грунтов перекрывающих отложений на исследуемых территориях

Свойство	Количество пар значений, шт.		Количество пар значений в выборке, %	Коэффициент линейной корреляции, д.е.
	в генеральной совокупности	в выборке		
<i>А. Оценка связи по пробам</i>				
Модуль общей деформации	1401	1284	91,6	0,71
Угол внутреннего трения	1459	1141	78,2	0,71
Удельное сцепление	1430	1219	85,2	0,72
<i>Б. Оценка связи по средним значениям в скважинах</i>				
Модуль общей деформации	396	352	88,9	0,72
Угол внутреннего трения	511	405	79,3	0,72
Удельное сцепление	510	441	86,5	0,72

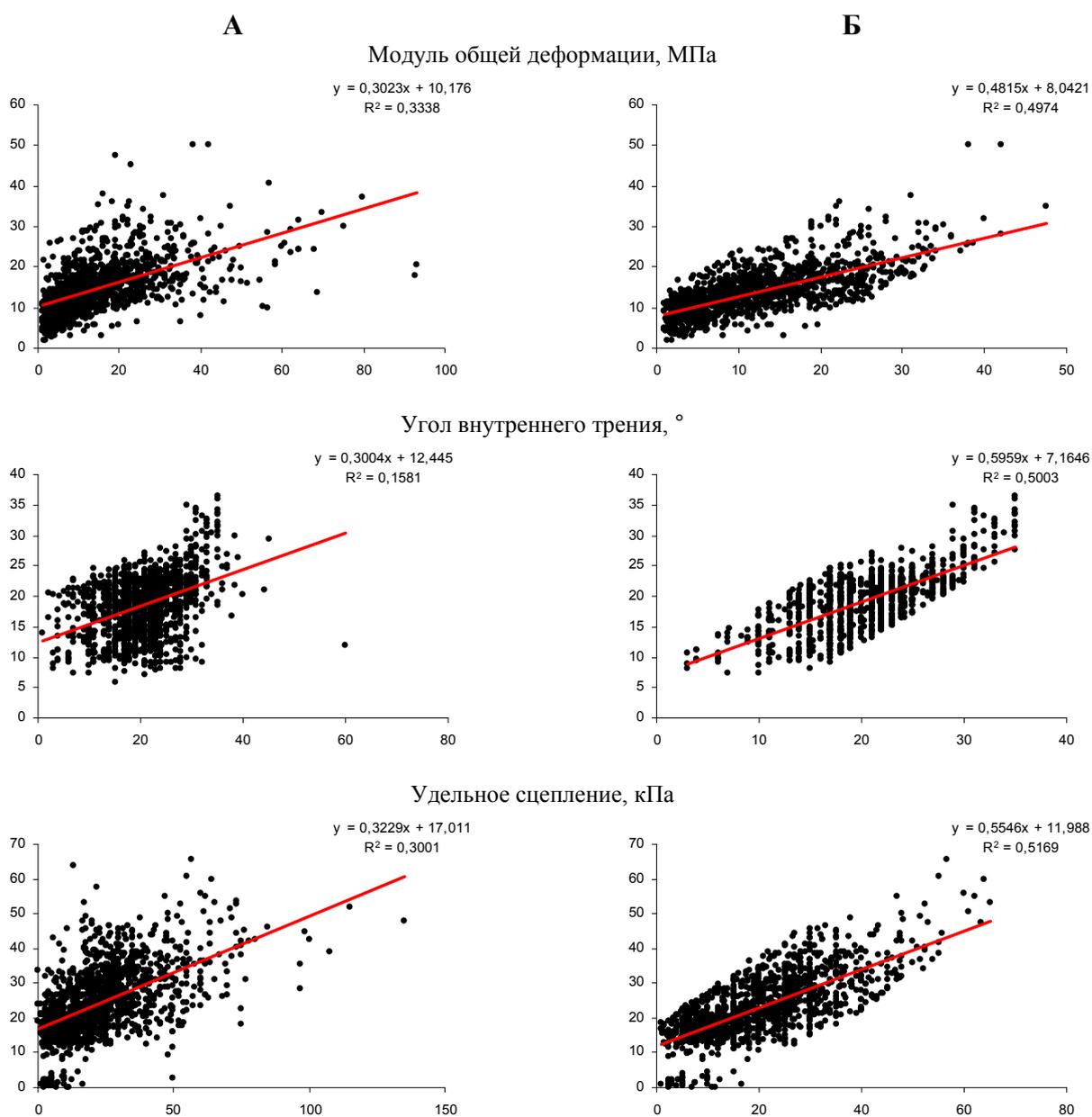


Рисунок 3.43. Зависимости табличных (ось Y) значений механических свойств грунтов от лабораторных (ось X), установленные по данным анализа грунтовых проб: А – вся совокупность пар значений (генеральная); Б – совокупность после отсеивания наиболее отклоняющихся от тренда пар значений

Цифровые картографические модели площадной изменчивости исследуемых свойств построены по их *средним значениям*, определенным в рамках каждой отдельно взятой скважины. Осреднение осуществлялось обычным методом, в результате расчета средних арифметических значений характеристик механических свойств в скважинах.

В результате сопоставления исследуемых характеристик механических свойств грунтов и карстовых форм в пределах исследуемых территорий был установлен нормальный характер распределения последних. Характерной особенностью является практически полное совпадение распределений разных карстовых форм друг с другом в 70% наблюдаемых распределений (рисунки 3.44-3.46). Данное наблюдение полностью повторяет выводы, сделанные ранее при рассмотрении характеристик физических свойств грунтов на территории г. Кунгур [173]. Большая часть карстовых форм тяготеет к средним значениям модуля общей деформации и удельного сцепления с небольшой асимметрией в сторону больших значений. В случае угла внутреннего трения асимметрия в сторону больших значений несколько больше. В целом точность выражения наблюдаемых распределений нормальным законом достаточно высока. Однако, исходя из сущности таких показателей, как модуль общей деформации и угол внутреннего трения, нулевые и близкие к нулю значения которых не характерны для природных грунтов, их итоговые обобщенные распределения описаны логнормальным законом, который в данных исследуемых случаях в целом повторяют нормальное распределение.

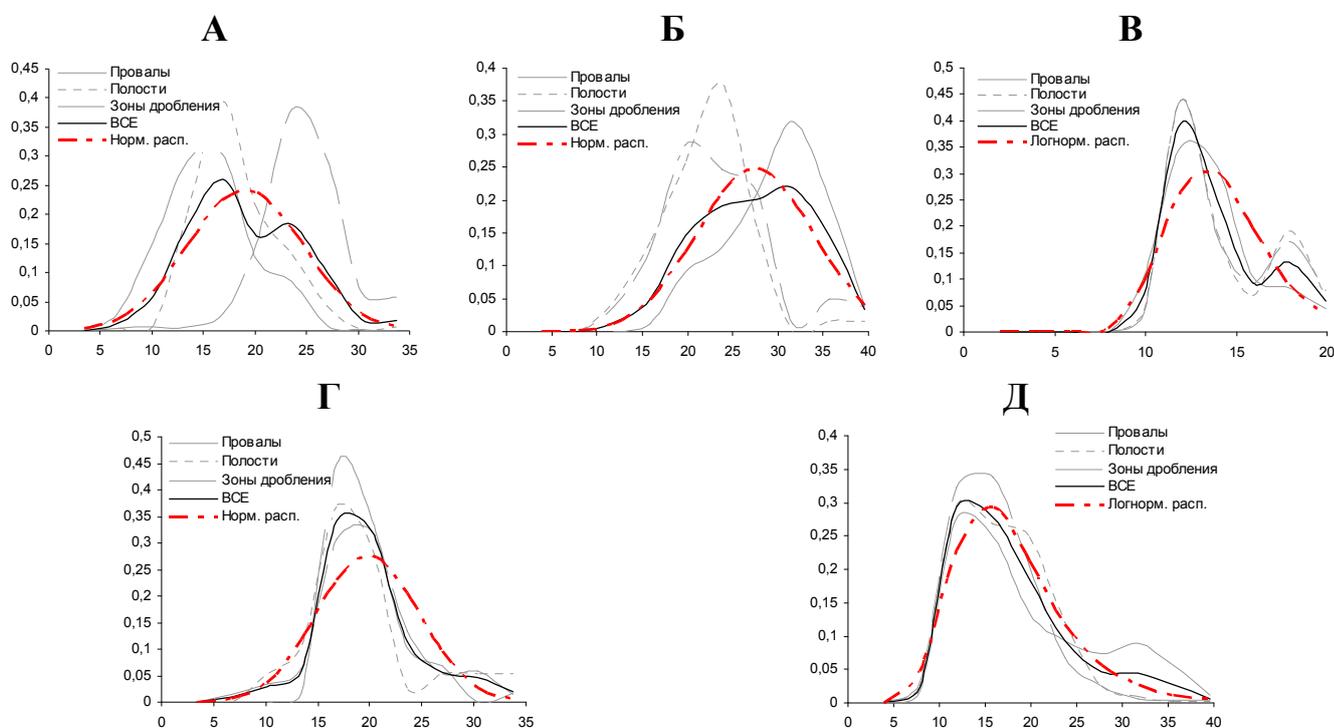


Рисунок 3.44. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений модуля общей деформации грунтов (ось X), МПа, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

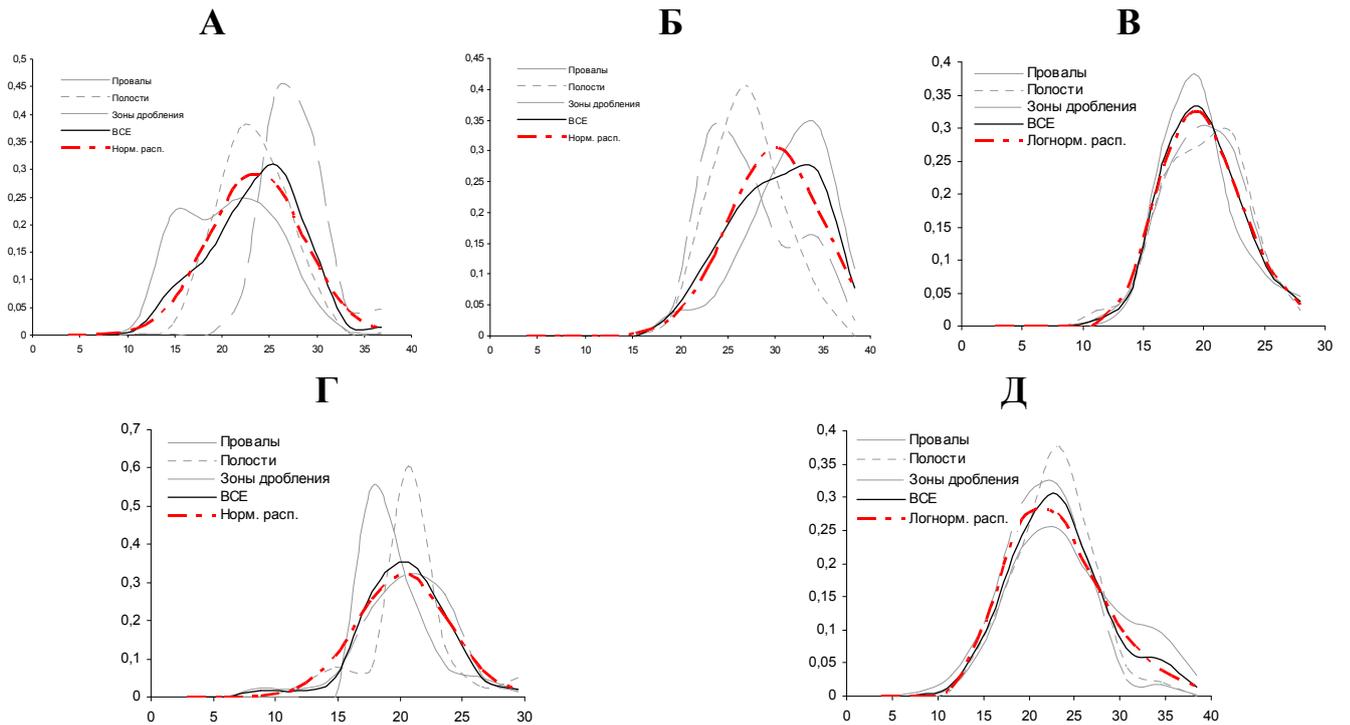


Рисунок 3.45. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений угла внутреннего трения грунтов (ось X), градус, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

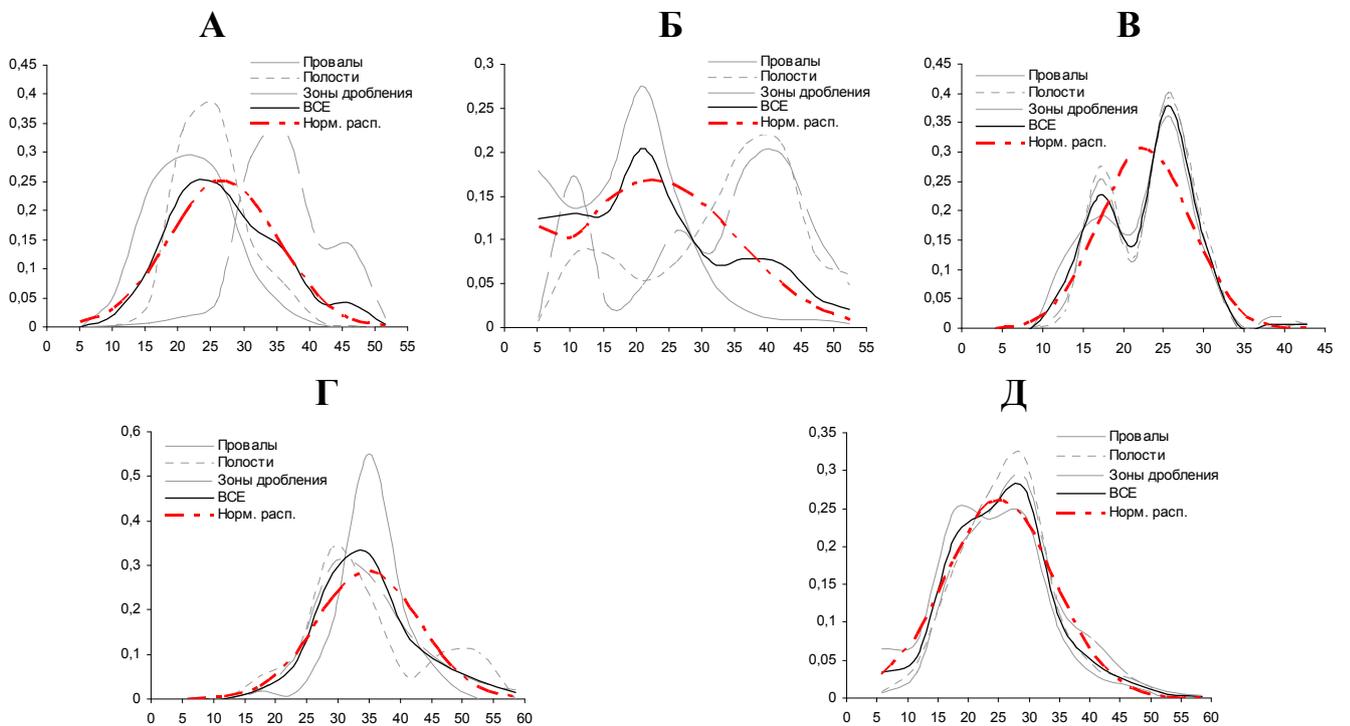


Рисунок 3.46. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удельного сцепления грунтов (ось X), кПа, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

На рисунках 3.47-3.48 довольно отчетливо прослеживается тенденция к росту средних значений морфометрических параметров карстовых форм на фоне роста значений модуля общей деформации и угла внутреннего трения грунтов. Наиболее ярко данная тенденция проявляется при анализе зон дробления, для которых характерно резкое увеличение мощности при высоких значениях этих двух механических характеристик. Обратный характер зависимости отмечается только для угла внутреннего трения при исследованиях в пределах пгт Полазна и приграничных территорий. Также следует заметить, что в случае поверхностных карстовых форм тенденция к росту их средних диаметров с увеличением модуля деформации и угла внутреннего трения при одновременном анализе сразу в пределах всех территориальных единиц не подтверждается, что, по всей видимости, вызвано спецификой методики исследования.

Влияние удельного сцепления на морфометрические характеристики карстопроявлений, наоборот, носит обратный характер (рисунок 3.49). Наиболее четко тенденция к уменьшению средних диаметров провалов и высот подземных карстовых форм с увеличением сцепления грунтов покровной толщи прослеживается на территории Ординского района и пос. Октябрьский. К сожалению, какую-либо взаимосвязь между этими величинами не удалось оценить в пределах территорий г. Кунгур и пгт Полазна. Обобщающая кривая изменчивости морфометрии карстовых форм в этих районах ориентирована почти горизонтально.

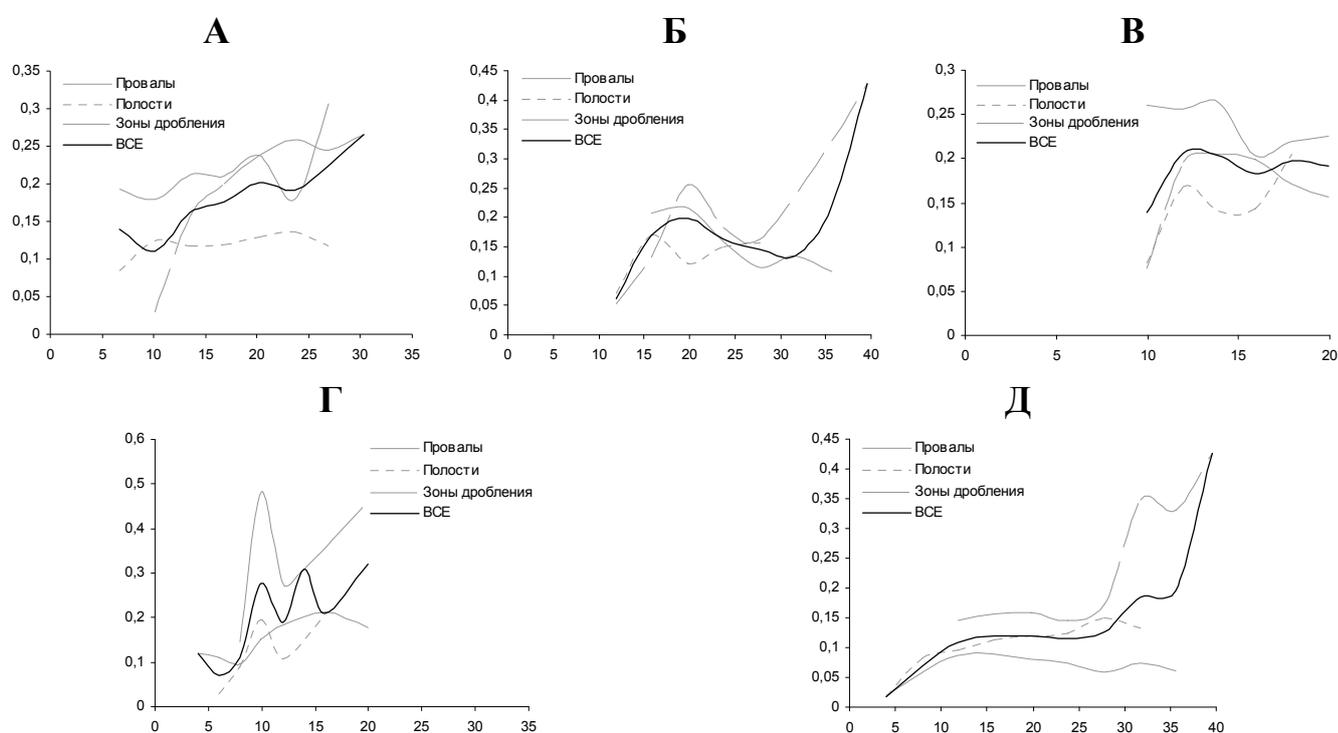


Рисунок 3.47. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений модуля общей деформации грунтов (ось X), МПа, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

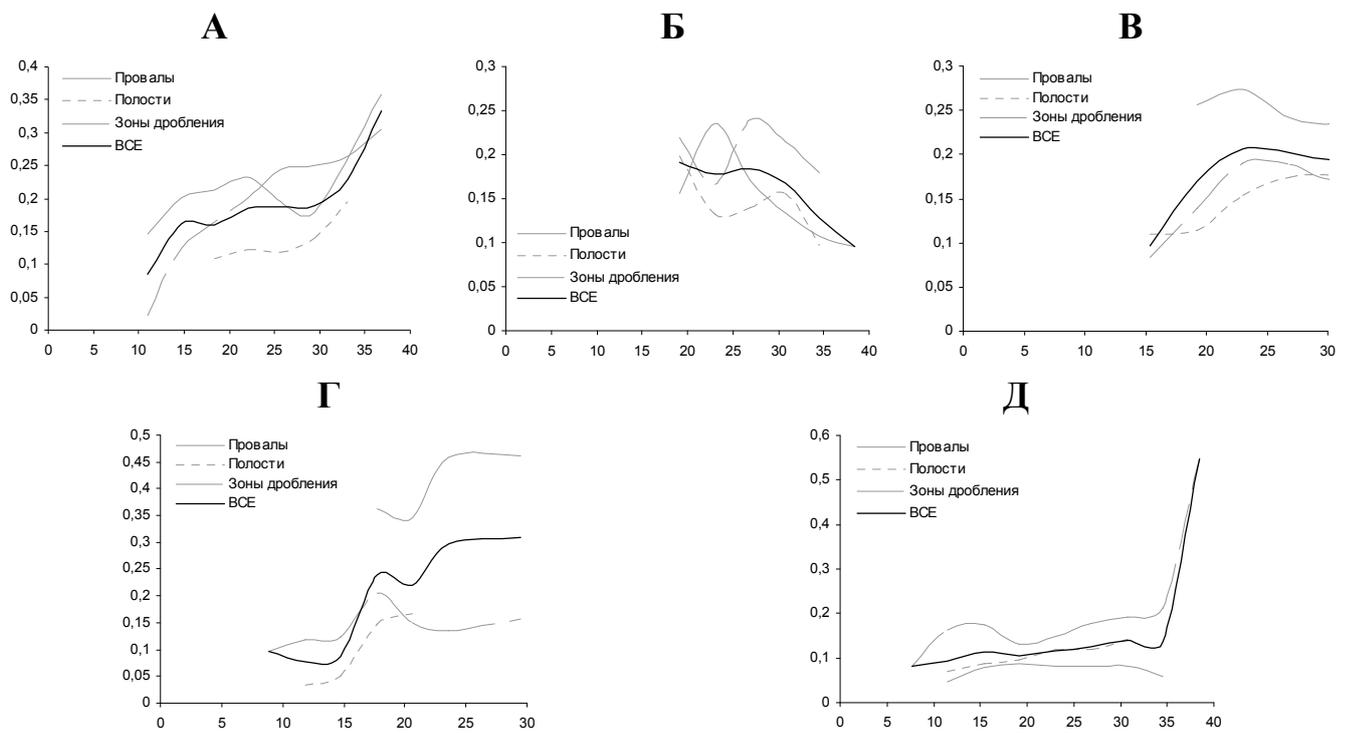


Рисунок 3.48. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений угла внутреннего трения грунтов (ось X), градус, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

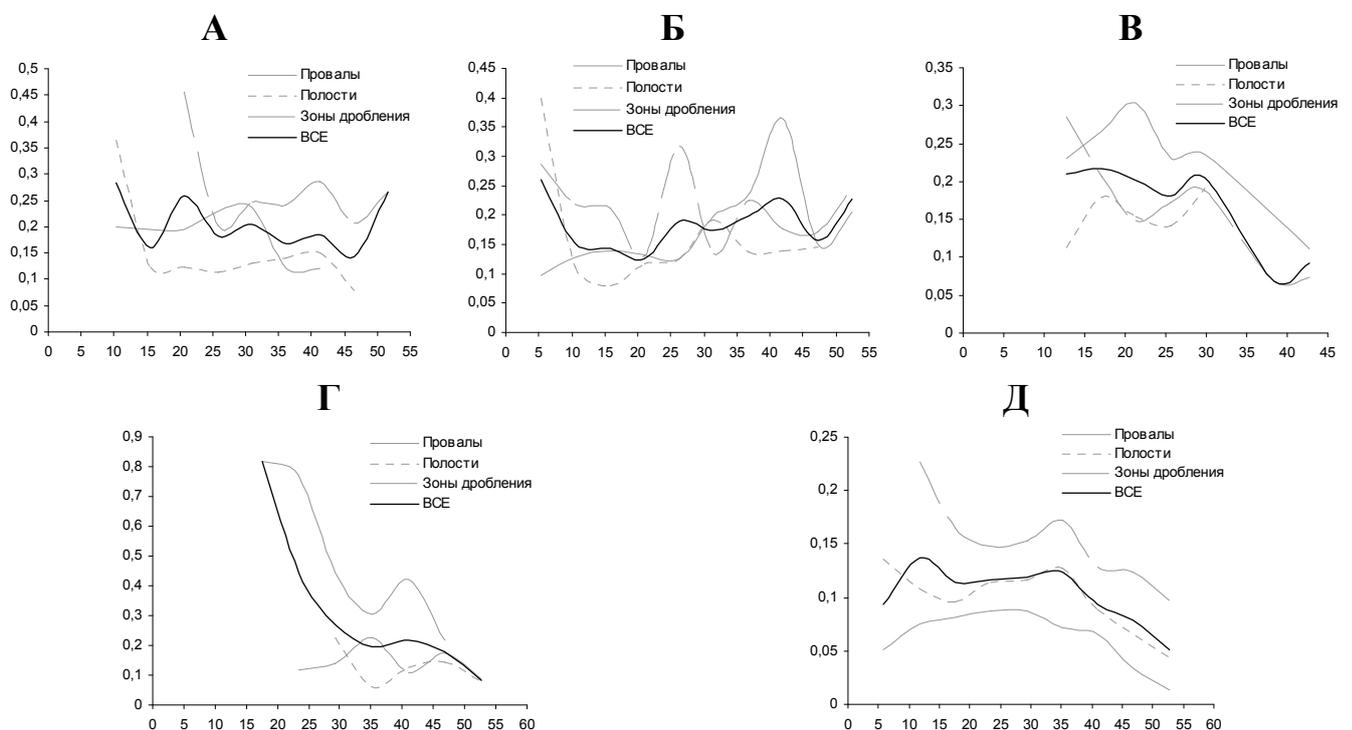


Рисунок 3.49. Средние диаметры и высоты карстовых форм (ось Y) в равных интервалах значений удельного сцепления грунтов (ось X), кПа, в пределах территории: А – г. Кунгур; Б – пгт Полазна; В – Ординского района; Г – пос. Октябрьский; Д – всех рассматриваемых участков

Отдельно следует обратить внимание на одну характерную черту, свойственную всем обобщенным графикам, описывающим зависимость между морфометрическими характеристиками и значениями механических свойств грунтов. Она заключается в наличии зоны «неявного тренда» в пределах средних значений свойств грунтов. Наличие такой зоны объясняется изначальной погрешностью, заложенной в саму процедуру анализа. Зачастую, оценка механических характеристик покровной толщи осуществлялась по относительно неглубоким скважинам (до 4-8 м), с достаточно редкой и неравномерной частотой опробования. Большая часть таких скважин не вскрывает кровлю карстующихся пород, и в редких случаях, количество произведенных опробований из них превышает число в 2-3 монолита. Проведение анализа в подобном ключе явилось вынужденной мерой в условиях недостатка информации, отсутствия равномерно распределенной сети опробований всей покровной толщи как площади, так и по глубине. Однако и при таких условиях удалось добиться положительного результата – установить принципиальные распределения карстовых форм по исследуемым характеристикам механических свойств дисперсных грунтов, а также выявить тенденции в изменчивости их средних морфометрических параметров.

3.5. Построение интегральной модели карстоопасности

Проблематика построения интегральной модели карстоопасности не только в максимальной степени учитывающей различные аспекты природных условий территории, но и отвечающей требованиям изыскательской практики до сих пор относится к разряду актуальных неразрешенных задач. Проведенный анализ существующих в настоящее время интегральных разработок показал, что большинство из них практически неприменимы в повседневной изыскательской деятельности. Почти все существующие интегральные методики оперируют неоднозначными показателями итоговой оценки, и зачастую не ориентированы на установление средних морфометрических параметров карстовых форм, останавливаясь лишь на прогнозе наиболее вероятных участков провалообразования.

Требования к современной методике интегральной оценки карстоопасности, сформулированные нами ранее, выдвигают необходимость вероятностного прогноза карстоопасности, а также оценку средних морфометрических параметров карстовых форм (провалов, полостей и зон дробления) на основе массовой статистической обработки карстологической информации и данных о природных условиях исследуемой территории. В конечном итоге результат оценки должен сводиться к установлению следующих характеристик карстоопасности:

- *вероятности* образования новой карстовой формы;

- среднего диаметра d или высоты h карстовой формы.

Следует отметить, что применению вероятностных оценок в инженерном карстоведении посвящено множество работ В.В. Толмачева и соавторов [149, 151]. Они отмечают, что вероятностная оценка в наибольшей степени отражает природу карстового процесса и особенность его познания. Вероятностная оценка карстоопасности является не только объективной, но и целесообразной. Более того, даже те способы оценки, в основе которых лежат детерминистические схемы и зависимости, при дальнейшем развитии должны иметь в конечном итоге вероятностный характер [149]. Целостность выражения карстоопасности через вероятность заключается в том, что величина вероятности может быть использована непосредственно в инженерных и технико-экономических расчетах [151].

Под идеальной вероятностной оценкой карстового процесса согласно В.В. Толмачеву и др. [149] следует понимать выражение ее через *вероятность образования карстовых провалов за заданный срок* P_s (например, за срок службы сооружений) на той или иной территории, которые могут вызвать недопустимые деформации сооружений, или через соответствующую *вероятность* P того, что таких провалов не произойдет:

$$P = 1 - P_s \quad (3.4)$$

Вероятностные методы позволяют оценивать и степень опасности отдельных карстовых полостей. Критерием такой оценки может быть также надежность – вероятность того, что в течение заданного времени карстовая полость не проявится на поверхности земли в виде провала [151].

Точность вероятностной оценки зависит от характера карстологической информации и полноты сведений о процессе провалообразования. Однако применение ориентировочных вероятностных оценок рекомендуется В.В. Толмачевым и в тех случаях, когда исходная карстологическая информация отсутствует или недостаточна для формализованного определения вероятности поражения территории или сооружений карстовыми провалами. В этом случае вероятность карстовых деформаций оценивается с учетом имеющихся сведений о природном строении территории [151].

Знание эмпирических распределений карстовых форм по отдельным показателям природного строения позволяет производить оценку вероятности образования новых карстопроявлений. Описание наблюдаемого распределения теоретическим законом в значительной степени упрощает процедуру оценки, т.к. появляется возможность использования аналитических зависимостей.

Результаты проведенного анализа по выявлению закономерностей распределения поверхностных и подземных карстопроявлений по значениям рассматриваемых показателей природного строения в пределах всех рассматриваемых территорий свидетельствуют о том, что

частные распределения различных разновидностей карстопоявлений в большинстве случаев практически совпадают друг с другом, что дает возможность заменять их одним общим распределением. В свою очередь общие распределения часто достаточно хорошо, а в некоторых случаях практически идеально описываются теоретическим законом распределения. Параметры теоретических распределений (среднее значение и среднеквадратическое отклонение) карстовых форм рекомендуемые при вероятностной оценке карстоопасности для рассматриваемых показателей природного строения приведены в таблице 2.13. Эти параметры могут быть применены при прогнозе карстообразования в пределах площадей распространения карста, где природные условия его развития схожи с эталонными территориями, для которых были установлены теоретические распределения.

С целью оценки вероятности, установленные теоретические распределения карстовых форм по исследуемым показателям природного строения в пределах рассматриваемых территорий предлагается анализировать в двух направлениях – в результате расчета *интегральной и дифференциальной функций распределения*.

Первое направление оценки вероятности заключается в расчете интегральной функции распределения, которая устанавливает частоту встречаемости карстовых форм в пределах определенного интервала значений исследуемого показателя природного строения. В математической статистике частота зачастую приравнивается к вероятности проявления события. Таким образом, вероятность образования карстовой формы может быть оценена *интегральной функцией F*, которая для рассматриваемых в анализе распределений рассчитывается следующим образом:

$$F = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} - \text{нормальный закон}, \quad (3.5)$$

$$F = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(\ln x_i - \ln \bar{x})^2}{2\sigma_{\ln x}^2}} - \text{логнормальный закон}, \quad (3.6)$$

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.

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. В практических расчетах наиболее удобно пользоваться следующей формулой (расширенная запись приведена на примере нормального распределения):

$$Pab = Fb - Fa = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^b e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} - \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^a e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \quad (3.7)$$

Точность оценки по интервальной вероятности Pab будет зависеть от размеров исследуемого участка и степени однородности природных условий в его пределах. Заметим, что данный подход к оценке вероятности достаточно широко применяется в теории надежности систем.

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. Расчетные формулы имеют следующий вид (расширенная запись приведена на примере нормального распределения):

$$Pb = 2Fb = \frac{2}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^b e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} - \text{при } Fb \leq 0,5 \quad (3.8)$$

$$Pb = 2(1 - Fb) = 2 \left(1 - \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^b e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \right) - \text{при } Fb > 0,5 \quad (3.9)$$

Величина Pb изменяется от 0 до 1, что удобно при районировании не только конкретной 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 полной интервальной вероятности Pb является возможность ее 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 величина Pb не является реальной вероятностной величиной. Она только в некоторой пропорции отражает активность и опасность развития карста в конкретных природных условиях.

Второе направление связано с расчетом *дифференциальной функции распределения* f :

$$f = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} - \text{нормальный закон,} \quad (3.10)$$

$$f = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x_i - \ln \bar{x})^2}{2\sigma_{\ln x}^2}} - \text{логнормальный закон} \quad (3.11)$$

Как известно из математической статистики, значения функции f могут изменяться в широких диапазонах в зависимости от типа и характера распределения. Наиболее часто они варьируют в интервале от 0 до 0,5, в случае некоторых распределений могут достигать значений 3-4 и более. При исследовании данного конкретного распределения, относящегося к семейству нормального закона, максимальное значение функция f будет принимать тогда, когда частное значение (x_i или $\ln x_i$) будет равно среднему. Соответственно минимальные значения функция f принимает при бесконечно малых и бесконечно больших значениях исследуемого показателя природного строения. Исходя из этого свойства дифференциальной функции нормального и логнормального распределений, оценку карстоопасности предлагается оценивать путем расчета *относительной вероятности образования карстовой формы p* :

$$p = \frac{f}{f(\bar{x})}, \quad (3.12)$$

где $f(\bar{x})$ – дифференциальная функция, рассчитанная для среднего значения показателя.

Величина p обладает практически теми же преимуществами, что и интервальная вероятность P , рассчитываемая при помощи интегральной функции. Она также изменяется в пределах от 0 до 1, с той лишь разницей, что чаще принимает значения превышающие 0,4-0,5. Следует понимать, что относительная вероятность, хоть и устанавливается с учетом конкретного распределения карстопроявлений, но в целом не является вероятностной оценкой как таковой. Она лишь отражает наиболее благоприятные условия для активизации карстового процесса, выраженные через значения конкретного рассматриваемого показателя природного строения.

Прогнозирование средних диаметров провалов, а также высот полостей и зон дробления подобно оценке вероятности их образования ведется в двух направлениях.

Первое направление основывается на выявленных взаимосвязях в площадной локализации и морфометрии поверхностных и подземных карстовых форм в пределах исследуемых территорий. В данном случае, исходя из общности распределений морфометрических характеристик карстовых форм, по известным параметрам одних из них (например, провалов) расчетным способом устанавливаются предварительные прогнозные значения морфометрических характеристик остальных карстопроявлений (полостей и зон дробления). Более подробно эта процедура рассмотрена в отдельном разделе.

Второе направление заключается в прогнозировании морфометрических параметров карстопроявлений в зависимости от значений показателей природного строения. Для этого используются установленные тренды соответствующих зависимостей. Отличительной чертой практических всех выявленных трендов является изменчивость средних индексных оценок морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм практически в одних и тех же диапазонах. Кроме того, в большинстве случаев, выявленная направленность

изменчивости морфометрии поверхностных карстовых форм в зависимости от значений показателей природного строения повторяет такую для подземных. Расхождения трендов различных карстопроявлений наблюдаются в единичных случаях и обычно приурочены к конкретным исследуемым территориальным единицам.

Принимая во внимание отмеченную идентичность трендов, установленных для различных карстовых форм, прогноз их диаметров по значениям показателей природного строения осуществляется по обобщенному тренду, характеризующему вклад всей совокупности карстопроявлений в рамках всех исследуемых территории. 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 (рисунок 3.50). 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 прогнозирующую кривую. Основными условиями, заложенными в алгоритм, являются необходимость построения прогнозной кривой не менее чем по 20-30% данных от первоначальной исследуемой совокупности и уровень корреляции рассматриваемых величин, превышающий 0,8.

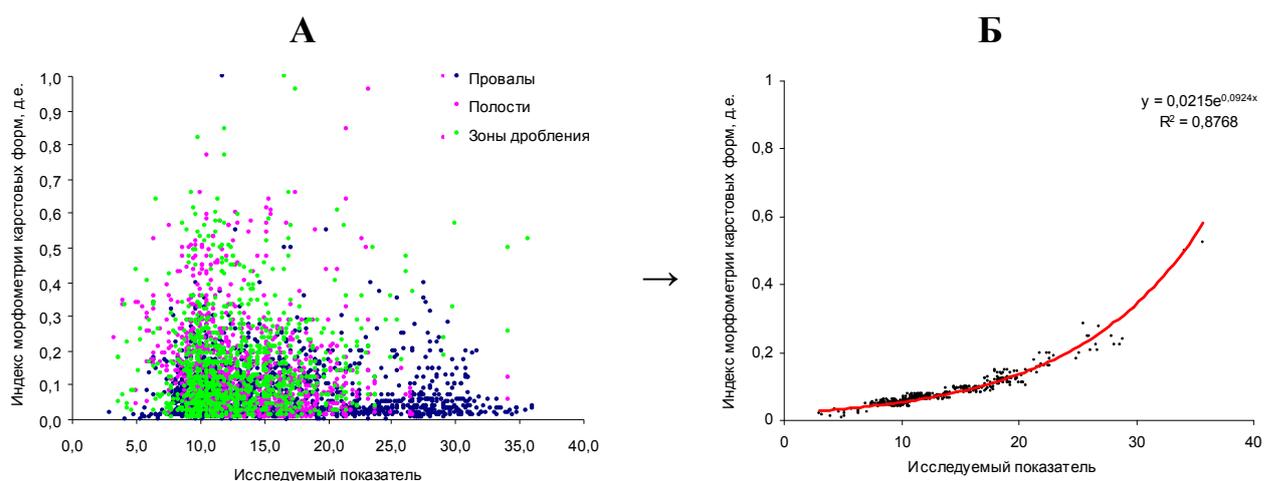


Рисунок 3.50. Пример построения зависимости индекса морфометрии карстовых форм от значений исследуемого показателя (Б) в результате автоматизированного вычленения облака точек (А)

Прогнозные уравнения для расчета индексных значений морфометрических параметров карстовых форм в зависимости от принятого к рассмотрению тренда и характера зависимости имеют следующий вид:

$$I = ax + b \text{ – линейная зависимость,} \quad (3.13)$$

$$I = a \ln x + b \text{ – логарифмическая зависимость,} \quad (3.14)$$

$$I = a \cdot e^{bx} \text{ – экспоненциальная зависимость,} \quad (3.15)$$

$$I = a \cdot x^b \text{ – степенная зависимость,} \quad (3.16)$$

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

Результаты интерпретации трендов представлены в виде прогнозных кривых, которые приведены на рисунках 3.51-3.55. Коэффициенты прогнозных уравнений и характер прогнозных зависимостей для различных показателей природного строения приведены в таблице 3.13.

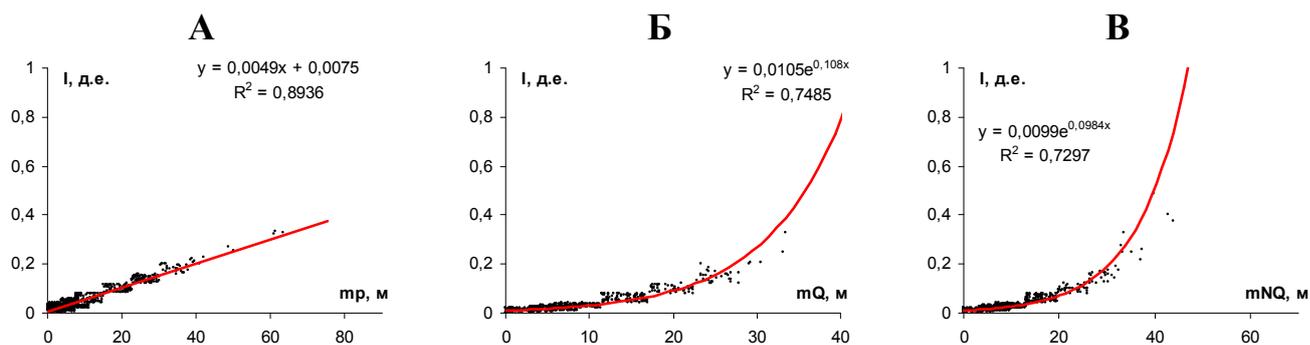


Рисунок 3.51. Прогнозные кривые для оценки индексов морфометрических параметров карстовых форм по показателям геологического строения: А – мощность покровной толщи отложений; Б – мощность четвертичных отложений; В – мощность неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений

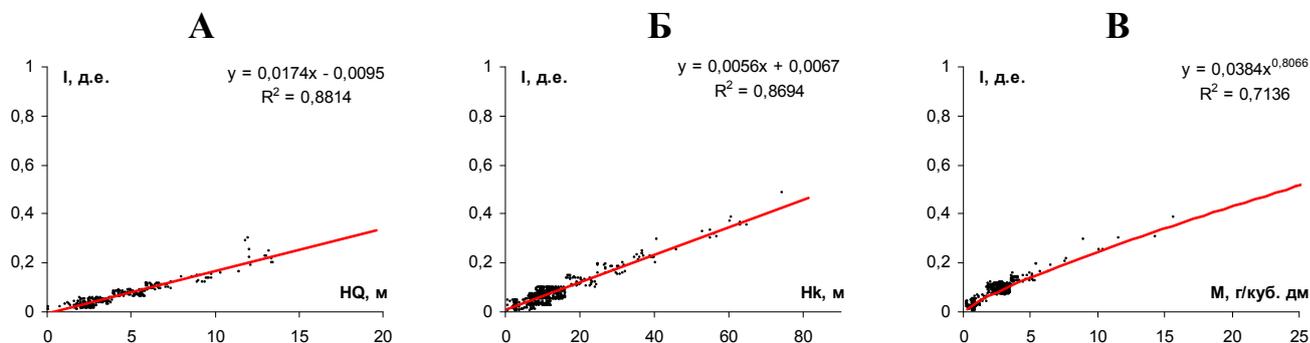


Рисунок 3.52. Прогнозные кривые для оценки индексов морфометрических параметров карстовых форм по показателям гидрогеологических условий: А – глубина установления грунтовых вод; Б – глубина установления трещинно-карстовых вод; В – минерализация грунтовых вод

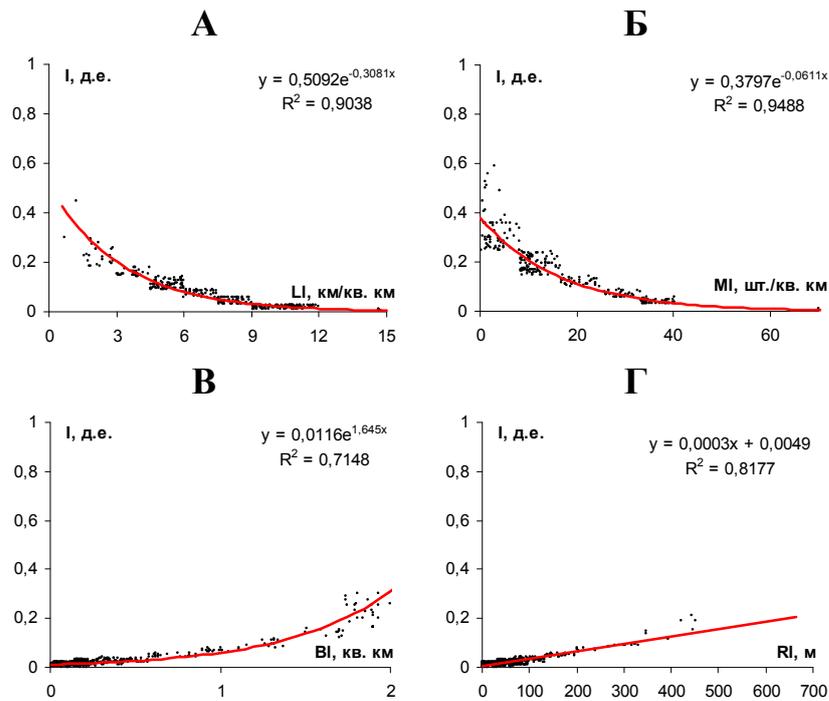


Рисунок 3.53. Прогнозные кривые для оценки морфометрических параметров карстовых форм по показателям структурно-тектонического строения: А – линейная плотность линеаментов; Б – количество пересечений линеаментов; В – блочность; Г – удаленность от линеаментов

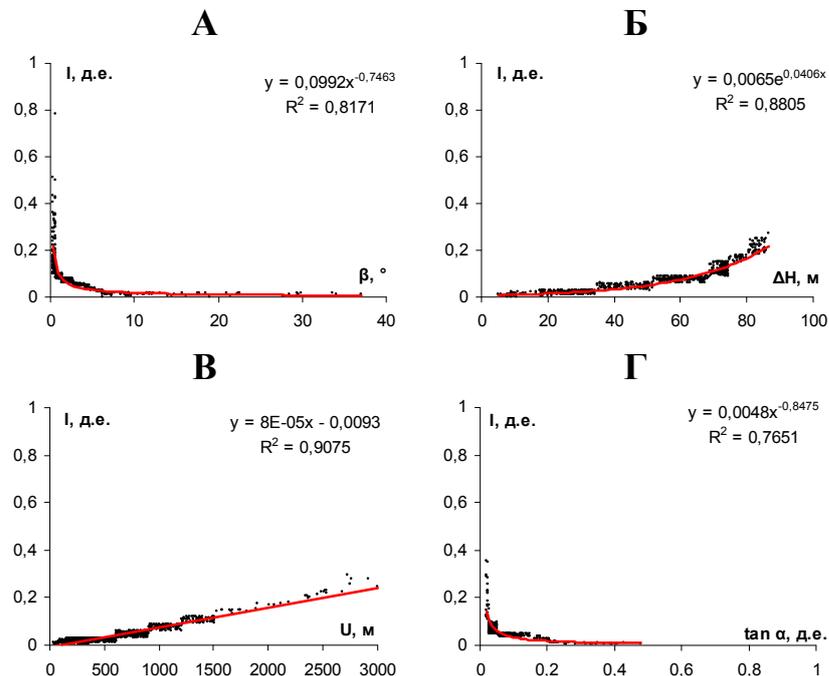


Рисунок 3.54. Прогнозные кривые для оценки морфометрических параметров карстовых форм по показателям геоморфологических условий: А – уклон рельефа; Б – превышение рельефа над средним уровнем рек; В – удаленность от рек; Г – уклон водосбора

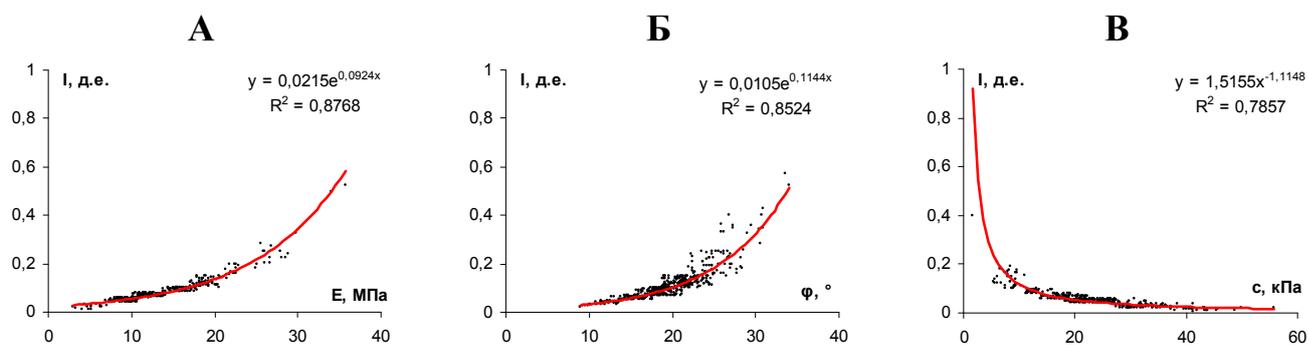


Рисунок 3.55. Прогнозные кривые для оценки морфометрических параметров карстовых форм по показателям инженерно-геологических условий: А – модуль общей деформации; Б – угол внутреннего трения; В – удельное сцепление

Таблица 3.13. 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}	стандартное отклонение σ		a	b	
Структурно-тектоническое строение St									
1	Линейная плотность линеаментов, км/км ²	L_l	14,7	-0,91	0,49	логнормальный	0,5092	-0,3081	экспоненциальная
2	Количество пересечений линеаментов, шт./км ²	M_l	70,7	-2,23	1,26	логнормальный	0,3797	-0,0611	экспоненциальная
3	Блочность, км ²	B_l	2,9	-2,53	1,17	логнормальный	0,0116	1,6450	экспоненциальная
4	Удаленность от линеаментов, м	R_l	665,0	-2,12	1,09	логнормальный	0,0003	0,0049	линейная
Геологическое строение G									
5	Мощность отложений покровной толщи, м	m_p	80,7	-2,02	1,38	логнормальный	0,0049	0,0075	линейная
6	Мощность четвертичных отложений, м	m_Q	36,6	-2,32	1,29	логнормальный	0,0105	0,1080	экспоненциальная
7	Мощность неоген-четвертичных обвальнокарстовых отложений, м	m_{NQ}	65,0	0,19	0,15	нормальный	0,0099	0,0984	экспоненциальная
Гидрогеологические условия Hg									
8	Глубина установления грунтовых вод, м	H_Q	19,60	-1,37	0,62	логнормальный	0,3162	-0,2667	экспоненциальная
9	Глубина установления трещинно-карстовых вод, м	H_k	81,40	-1,39	0,96	логнормальный	0,0056	0,0067	линейная
10	Минерализация подземных вод, г/дм ³	M	21,20	-2,73	0,89	логнормальный	0,0384	0,8066	степенная
Геоморфологические условия Ge									
11	Уклон рельефа, градус	β	47,30	-3,57	0,98	логнормальный	0,0992	-0,7463	степенная
12	Превышение над средним уровнем рек, м	ΔH	114,70	0,52	0,18	нормальный	0,0065	0,0406	экспоненциальная
13	Удаленность от речной сети, м	U	3028,70	-1,65	0,90	логнормальный	0,0001	-0,0093	линейная
14	Уклон водосбора, д.е.	$\tan \alpha$	2,22	-3,34	0,74	логнормальный	0,0048	-0,8475	степенная
Инженерно-геологические условия Eg									
15	Модуль общей деформации, МПа	E_0	39,60	-0,98	0,37	логнормальный	0,0215	0,0924	экспоненциальная
16	Угол внутреннего трения, °	φ	38,40	-0,62	0,26	логнормальный	0,0105	0,1144	экспоненциальная
17	Удельное сцепление, кПа	c	58,50	0,38	0,15	нормальный	1,5155	-1,1148	степенная

* Параметры теоретических распределений выражены в индексной форме

Вероятностные оценки карстоопасности (Pab , Pb и 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:

$$x = a_{St}x_{St} + a_Gx_G + a_{Hg}x_{Hg} + a_{Ge}x_{Ge} + a_{Eg}x_{Eg}, \quad (3.17)$$

где a – весовые коэффициенты, x – 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 опасного процесса 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. Один из вариантов объективного расчета интегральной модели какого-либо параметра опасности x сводится к последовательному выполнению следующего алгоритма:

1. Расчет нормативной интегральной модели x_n анализируемого параметра опасности. Такой расчет производится при весовых коэффициентах равных 0,2:

$$x_n = 0,2x_{St} + 0,2x_G + 0,2x_{Hg} + 0,2x_{Ge} + 0,2x_{Eg}, \quad (3.18)$$

Заметим, что такая модель сама по себе уже может являться результатом конечной оценки при условии достаточно большой выборки данных, по которым установлены значения частных (для отдельного взятого показателя) и групповых (в рамках отдельной группы) значений параметра опасностей.

2. Расчет интегральной модели для наиболее опасного x_{max} и наименее опасного x_{min} случаев. Интегральная модель анализируемого параметра, отвечающая наиболее опасному случаю, рассчитывается при весовых коэффициентах, установленных с применением следующих формул:

$$\max a_{St} = \frac{x_{St}}{\sum x}, \quad \max a_G = \frac{x_G}{\sum x}, \quad \max a_{Hg} = \frac{x_{Hg}}{\sum x}, \quad \max a_{Ge} = \frac{x_{Ge}}{\sum x}, \quad \max a_{Eg} = \frac{x_{Eg}}{\sum x}, \quad (3.19)$$

где $\sum x$ – суммарная оценка анализируемого параметра опасности по всем группам.

Соответственно, весовые коэффициенты к интегральной модели, характеризующей наименее опасный случай, рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \min a_{St} &= \frac{1 - x_{St}}{\sum x}, & \min a_G &= \frac{1 - x_G}{\sum x}, & \min a_{Hg} &= \frac{1 - x_{Hg}}{\sum x}, \\ \min a_{Ge} &= \frac{1 - x_{Ge}}{\sum x}, & \min a_{Eg} &= \frac{1 - x_{Eg}}{\sum x} \end{aligned} \quad (3.20)$$

3. Расчет интегральной модели, отвечающей умеренно опасному случаю x_{sr} . Такая модель устанавливается при весовых коэффициентах, получаемых осреднением таковых для наиболее и наименее опасных случаев:

$$\begin{aligned} sr a_{St} &= \frac{\max a_{St} + \min a_{St}}{2}, & sr a_G &= \frac{\max a_G + \min a_G}{2}, & sr a_{Hg} &= \frac{\max a_{Hg} + \min a_{Hg}}{2}, \\ sr a_{Ge} &= \frac{\max a_{Ge} + \min a_{Ge}}{2}, & sr a_{Eg} &= \frac{\max a_{Eg} + \min a_{Eg}}{2} \end{aligned} \quad (3.21)$$

4. Выбор оптимальной интегральной модели. Если выполняется критерий $|x_n - x_{sr}| < 0,05$, то в качестве оптимальной модели следует принимать модель x_{min} . При $0,05 \leq |x_n - x_{sr}| < 0,10$ оптимальной будет являться модель x_{sr} . В остальных случаях за оптимальную интегральную модель принимается x_{max} .

Сопоставление рассчитанных интегральных значений вероятностей Pab , Pb и p образования карстовых форм с результатами ранее производимого районирования исследуемых территорий по интенсивности провалообразования (согласно СП [16]) за 100-летний срок с выделением соответствующих категорий устойчивости позволило осуществить их качественную экспертную корреляцию. Было установлено, что наиболее широко в площадном отношении представлены участки, в пределах которых значения рассматриваемых вероятностных параметров изменяются в пределах 0,03-0,20, 0,3-0,6 и 0,4-0,9 соответственно. Эти участки в большинстве своем соответствуют II, III и IV категориям устойчивости. Участки, характеризующиеся I категорией устойчивости, в пределах исследуемых территорий в целом представлены достаточно редко и в картографическом плане проявляются локальными пятнами. В их пределах и в смежных с ними зонах значения вероятностных характеристик Pab , Pb и p обычно повышены и составляют 0,20-0,30, 0,6-0,7 и 0,8-1,0 соответственно. Похожая картина наблюдается и в отношении относительно устойчивых участков (V категория), в пределах которых значения вероятностных параметров опасности, как правило, не превышают 0,07, 0,2-0,3 и 0,5 соответственно. Принимая это во внимание, в таблице 3.14 приведена шкала, позволяющая переходить от расчетных значений интегральных интервальной, полной интервальной и относительной вероятностей образования карстовых форм к категориям

устойчивости по интенсивности провалообразования. 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.

Таблица 3.14. Сопоставление значений интервальной P_{ab} , полной интервальной P_b и относительной вероятностей p с категориями устойчивости по интенсивности провалообразования λ

λ	VI	V	IV	III	II	I
P_{ab}	0	0 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	>0,25
P_b	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

Общий порядок действий при оценке карстоопасности интегральным методом с применением установленных зависимостей сводится к последовательному выполнению следующих операций:

- 1) формирование комплекса исследуемых показателей природного строения, исходя из имеющейся информации и степени изученности территории;
- 2) определение значений показателей в исследуемых точках или оценка их минимальных и максимальных значений в пределах некоторой исследуемой площади;
- 3) переход от истинных значений показателей природного строения к их индексным формам выражения путем деления на максимальные значения, установленные в пределах региона и приведенные в таблице 3.13;
- 4) расчет интервальной P_{ab} , полной интервальной P_b и относительной вероятности p образования карстовых форм по формулам 3.5-3.12 для каждого отдельно взятого показателя природного строения с учетом свойственных ему параметров распределения, приведенных в таблице 3.13;
- 5) расчет прогнозных средних индексных оценок морфометрических параметров карстовых форм в зависимости от значений каждого отдельно взятого показателя природного строения с учетом характера зависимости и коэффициентов прогнозного уравнения, приведенных в таблице 3.13;
- 6) переход от спрогнозированных средних индексных оценок морфометрических параметров карстовых форм к средним диаметрам провалов, высотам полостей и зон дробления в результате выполнения обратной операции – умножения индексного значения на региональные максимумы исследуемых морфометрических параметров провалов, полостей и зон дробления,

приведенные в таблице 3.10. Дополнительно могут быть оценены глубины провалов (таблица 3.5, строка «ОБЩЕЕ»);

7) разделение всей совокупности показателей природного строения на группы, расчет интегральных моделей анализируемых параметров опасности и выбор оптимальных из них;

8) построение картографических моделей изменчивости интегральных параметров карстоопасности по площади в пределах исследуемой территории.

С целью автоматизации процесса оценки приведенный алгоритм реализован авторами в среде электронных таблиц Microsoft Excel в формате отдельного расчетного модуля, в который вошли параметры всех установленных в процессе исследований зависимостей по всем рассматриваемым показателям. Процедура оценки карстоопасности с применением данного модуля сводится к вводу данных по значениям показателей природного строения в каждой конкретной исследуемой точке, а также требует единовременного ввода весовых коэффициентов для их различных групп. Остальные операции выполняются в автоматизированном режиме. На выходе пользователь получает значения вероятностей (P_{ab} , P_b и p) и соответствующие им категории устойчивости по интенсивности провалообразования [16], а также средние значения диаметров и глубин провалов, высот полостей и мощностей зон дробления. По значениям средних диаметров автоматически устанавливаются категории устойчивости в соответствии с СП [16].

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ ОЦЕНКЕ КАРСТООПАСНОСТИ

Установленные зависимости и разработанная на их основе методология к оценке карстоопасности апробированы 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 применения интегрального подхода к оценке карстоопасности при изысканиях на трассе водовода в пределах Солдатовского нефтяного месторождения и на площадке строительства поглощающих скважин на Кокуйском нефтегазовом месторождении (рисунок 4.1).

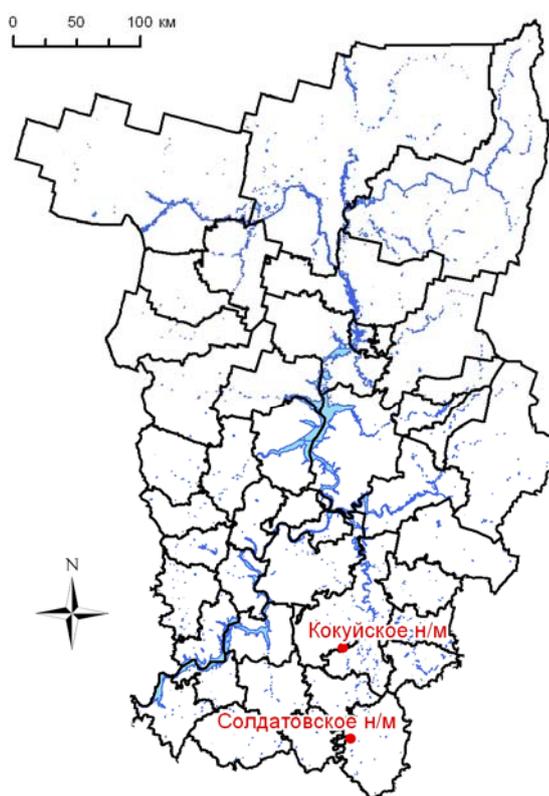


Рисунок 4.1. Расположение участков применения интегральной подхода в пределах территории Пермского края

В административном отношении исследуемые участки находятся на территориях Октябрьского (трасса водовода) и Ординского (площадка поглощающих скважин) административных районов Пермского края. Ближайшим населенным пунктом к трассе водовода является д. Егашка. Ближайшая асфальтированная автомобильная дорога – «Чернушка-Октябрьский», расположена южнее объекта в 2,0 км от точки врезки водовода близ ДНС. Трасса

занимает земли ГКУ «Октябрьское лесничество». Площадка строительства поглощающих скважин расположена в границах Карьевской сельской администрации в 1,8 км северо-западнее пос. Карьево. Изыскиваемая площадка расположена на территории УППН «Кокуй» Кокуйского нефтяного месторождения.

Изучаемые участки приурочены к району умеренно-континентального климата, формирующегося под влиянием западных циклонов, приносящих обогащенные влагой воздушные массы с Атлантики. По схематической карте климатического районирования для строительства (СНиП [14]) район исследований относится к категории IV. Более подробная климатическая и гидрологическая характеристика центральной и юго-восточной части Пермского края приведена ранее при рассмотрении пилотных территорий (см. главу 2), сведения о природных условиях и развитии карста в пределах которых легли в основу разработки методологии интегральной оценки.

Согласно схеме геоморфологического районирования Пермского края [105] исследуемые участки приурочены к восточной оконечности Восточно-Европейской равнины, области Камских равнин, увалов и возвышенностей, и локализованы в пределах района Уфимского плато с Сылвинским кряжем (рисунок 2.2, А). В структурно-тектоническом отношении согласно схеме районирования ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» исследуемые участки приурочены к крупным положительным структурам, характеризующимся приподнятым залеганием коренных пермских отложений (рисунок 2.2, Б). Участок трассы водовода Солдатовского месторождения приурочен к Башкирскому своду, а площадка поглощающих скважин Кокуйского месторождения локализована в приграничной зоне между Бымско-Кунгурской моноклиной и Бабкинской седловиной. Согласно СП [18] (по карте ОСРО-97-А для массового строительства) на исследуемой территории расчетная интенсивность сейсмических сотрясений 5 и менее баллов по шкале MSK-64, ожидаемой на данной площади с вероятностью 10%.

Характерной особенностью и одним из осложняющих и неблагоприятных факторов при проектировании и строительстве в исследуемых районах является закарстованность. По данным районирования К.А. Горбуновой и др. [42] территории проектируемого водовода и площадки поглощающих скважин относятся к Иренскому району преимущественно сульфатного и карбонатно-сульфатного карста (рисунок 2.6, А). Согласно рисунку 2.6, Б основными карстующимися породами здесь являются гипсы и ангидриты с подчиненным значением известняков и доломитов. Необходимо отметить, что трасса водовода локализована в приграничной зоне, где карстующиеся гипсангидритовые толщи резко выклиниваются и преобладающей в разрезе становится толща терригенно-карбонатных отложений.

Согласно СП [16] (п. 5.1.5) гипсы и ангидриты являются среднерастворимыми, а известняки и доломиты – трудно растворимыми породами. По степени обнаженности

карстующихся пород и характеру перекрывающей толщи в пределах изучаемых участков развит преимущественно покрытый тип карста, реже – открытый тип. По времени образования карст современный, т.к. он продолжает проявлять себя в виде образования новых карстовых форм.

Далее приведены результаты более детального изучения структурно-тектонических, геоморфологических, геолого-гидрогеологических, инженерно-геологических и карстологических условий в пределах изучаемых участков, а также результаты применения интегрального подхода при оценке карстоопасности в их пределах.

4.1. Интегральная оценка карстоопасности трассы водовода

В геоморфологическом отношении трасса водовода на своем протяжении проходит по водораздельной (абс. отм. более 220 м), склоновой (абс. отм. 195-220 м) и пойменной (абс. отм. менее 195 м) частям рр. Уяс, Егашка и Куклеян. Абсолютные отметки поверхности земли на протяжении трассы по данным анализа топоплана масштаба 1:100000 и снимков SRTM изменяются в пределах от 188,0 м до 235,0 м. На северной оконечности трассы в районе кустовой площадки № 36 отметки поверхности изменяются от 227,0 до 232,0 м. На момент изысканий рельеф площадки находился в стадии планировки, был осложнен навалами земли (рисунок 4.2, А).

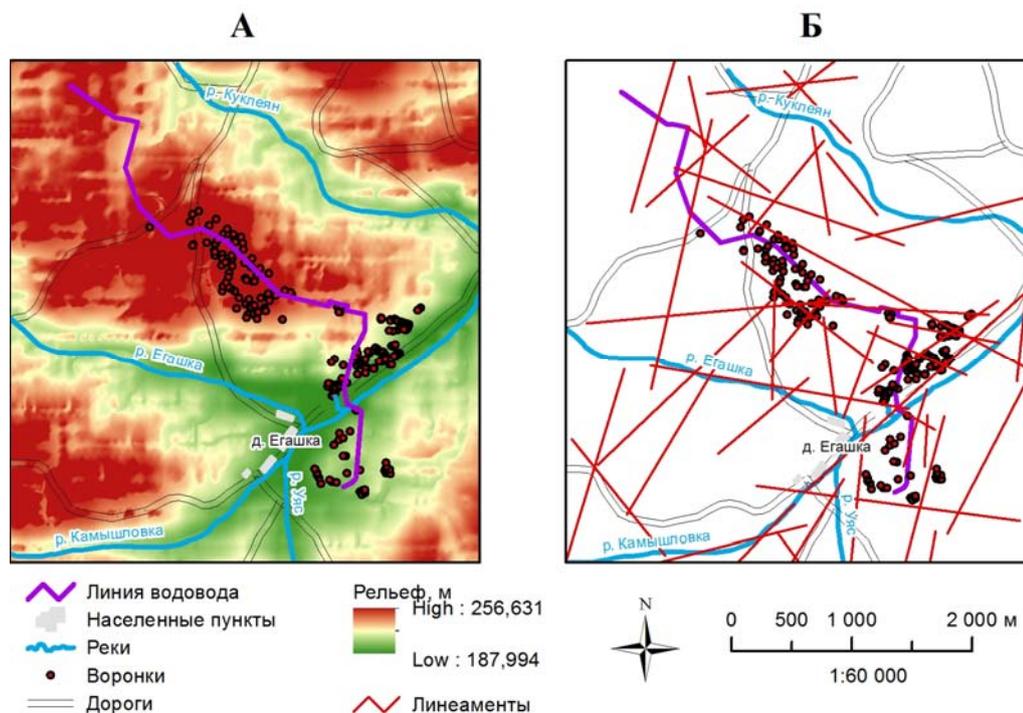


Рисунок 4.2. Особенности строения рельефа (А) и распространение линеаментов (Б) в пределах исследуемого участка трассы водовода Солдатовского нефтяного месторождения

В ходе комплексного анализа космоснимков высокого разрешения (портал Kosmosnimki.ru, спутник Bird's Eye, сервисы Bingmaps и Google) в пределах исследуемого участка была выявлена

сеть линейных элементов различной природы (рисунок 4.2, Б). Дешифрирование и картирование линеаментов сопровождалось построением карт их линейной плотности и количества пересечений в пределах определенной расчетной площади, удаленности от линеаментов и линеаментной блочности.

С целью изучения геолого-гидрогеологических и инженерно-геологических условий в коридоре трассы пробурено 36 инженерно-геологических скважин и 2 карстологические скважины, а также проведены полевые электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с осуществлением замеров в 92 точках (пикетах) (рисунок 4.3).

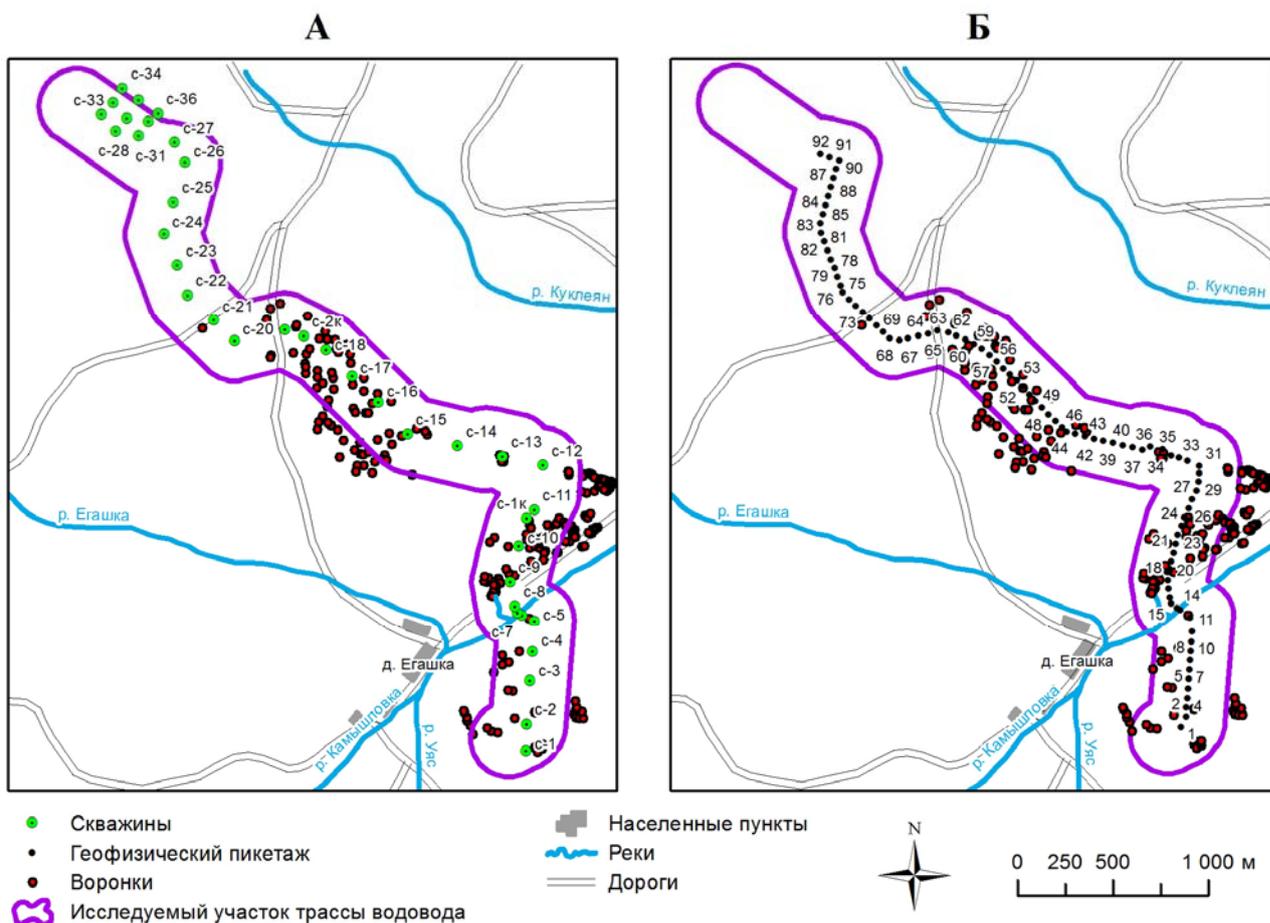


Рисунок 4.3. Расположение инженерно-геологических скважин и геофизических пикетов в пределах изыскиваемой площади участка трассы водовода

Бурение скважин проводилось механическим колонковым способом станком УРБ-2А-2 диаметром 127 мм без обсадки. Глубина инженерно-геологических скважин по трассе проектируемого водовода изменялась от 4,0 до 8,0 м. Карстологические скважины пробурены до глубины 20,0 м с целью установления глубины залегания карстующихся отложений на ключевых наиболее опасных участках.

Интерпретационный процесс геофизических данных включал первичную обработку, качественную и количественную интерпретацию полевых материалов. На этапе качественной интерпретации решались главным образом вопросы изучения общего характера пространственного изменения электрических свойств среды. Для определения количественных параметров – мощностей и удельных электрических сопротивлений основных пачек пород геологического разреза была выполнена количественная интерпретация данных электрического зондирования по исследуемой трассе. Глубина зондирования составила 20-25 м.

В геологическом строении территории, по которой проходит трасса водовода, принимают участие четвертичные суглинки и крупнообломочные грунты с суглинистым заполнителем, неоген-четвертичные обвальное-карстовые отложения, а также коренные нижнепермские гипсы и ангидриты.

Четвертичные отложения элювиально-делювиального (edQ) генезиса слагают большие площади, в основном на пологих склонах междуречий и водоразделах. Они представлены суглинками и щебенисто-дресвяными грунтами с суглинистым заполнителем. Аллювиальные (aQ) и аллювиально-делювиальные (adQ) четвертичные отложения приурочены к долине р. Уяс и имеют ограниченное распространение по площади, характеризуются малой мощностью (до 2,0-2,5 м) и изменчивостью инженерно-геологических свойств. Аллювиальные отложения часто обводнены, представлены суглинками с единичными включениями древесных остатков.

Ниже по разрезу развиты неоген-четвертичные (N-Q) обвальное-карстовые отложения, сложенные щебенисто-дресвяными грунтами (щебень и дресва гипса, ангидрита, известняка и доломита) с суглинистым заполнителем. Обвальное-карстовые отложения широко развиты в разрезе, характеризуются перемешанным и не слежавшимся характером залегания, малой плотностью сложения.

Коренные нижнепермские гипсы и ангидриты иренского горизонта (P_{1ir}) развиты повсеместно под слоем неоген-четвертичных обвальное-карстовых отложений, реже четвертичных элювиально-делювиальных суглинков и крупнообломочных грунтов. По данным геофизических исследований, проведенных вдоль трассы, и колонок карстологических скважин глубина их залегания колеблется от 7,0-10,0 м до 20,0 м и более. Коренные карстующиеся породы обнажаются по левому берегу р. Уяс, а при удалении трассы вглубь водораздела постепенно погружаются вниз.

Сводный геолого-литологический разрез по данным бурения до глубины 20,0 м следующий (сверху вниз):

Почвенно-растительный слой (pQ) распространен повсеместно мощностью до 0,2-0,4 м.

Суглинок (edQ) коричневый тугопластичный, мягкопластичный тяжелый пылеватый с редкими включениями дресвы и щебня известняка, гипса и ангидрита, в подошве слоя

содержание щебня и дресвы коренных пород до 10-40%. Распространен повсеместно на водоразделах и склонах долин рек и ручьев под почвенно-растительным слоем. Мощность 1,3-5,4 м.

Суглинок (adQ) серый, серо-коричневый мягкопластичный тяжелый пылеватый с единичными включениями древесных остатков. Встречен в пойме р. Уяс. Мощность 1,6-2,2 м.

Дресвяный грунт (edQ) представленный дресвой и щебнем известняка серого выветрелого очень низкой прочности с суглинистым заполнителем. Суглинок коричневый, серовато-коричневый тугопластичный тяжелый пылеватый. Встречен на участке трассы, проходящем по правому берегу р. Уяс (у точки врезки) и в пойме под слоем суглинков (adQ, edQ). Глубина вскрытия 2,0-3,0 м, вскрытая мощность 1,0-2,0 м.

Щебенистый грунт (N-Q) представленный щебнем и дресвой гипса и ангидрита светло-серых выветрелых очень низкой прочности с суглинистым заполнителем. Ближе к концу трассы (скважины №№ 27-36) щебень и дресва известняка серого выветрелого очень низкой прочности с суглинистым заполнителем. Суглинок светло-коричневый тугопластичный тяжелый пылеватый. Встречен на правом и левом закарстованных склонах и на водоразделе рр. Уяс и Егашка под слоем суглинков (edQ) начиная с глубин 1,3-3,8 м. Вскрытая мощность 0,2-14,8 м. В конце трассы, по-видимому, мощность обвальнo-карстовых отложений повышается и может превышать 20,0 м

Гипс (P_{1gr}) светло-серый, серый сильнотрещиноватый выветрелый кавернозный очень низкой прочности. Встречен карстологическими скважинами №№ 1к и 2к на глубинах 12,3-18,5 м под слоем щебенистого грунта. Вскрытая мощность 1,5-7,7 м.

Изменчивость грунтов по площади и в разрезе можно проследить из геоэлектрических разрезов, построенных в результате количественной интерпретации геофизических данных и материалов буровых работ (рисунки 4.4, 4.5). Они отображают особенности строения и характер изменения электрических свойств отложений, слагающих приповерхностную часть разреза.

В приповерхностной толще выделяется пять основных геоэлектрических слоев, диапазон изменения сопротивлений которых находится в пределах 7–713 Ом·м. Первые три геоэлектрических слоя объединяются в толщу пониженного сопротивления и характеризуют собой отложения суглинистого состава. Наиболее низкоомные области (7-15 Ом·м) мощностью до 10 м наблюдаются в районе ПК ВЭЗ 3, 4, 10, 11, 22-33, 50, 56, 61, 62, 66, 68, 70, 72-77. На участке трассы в районе ПК ВЭЗ 55-73, 85-92 наблюдается увеличение мощности отложений суглинистого состава.

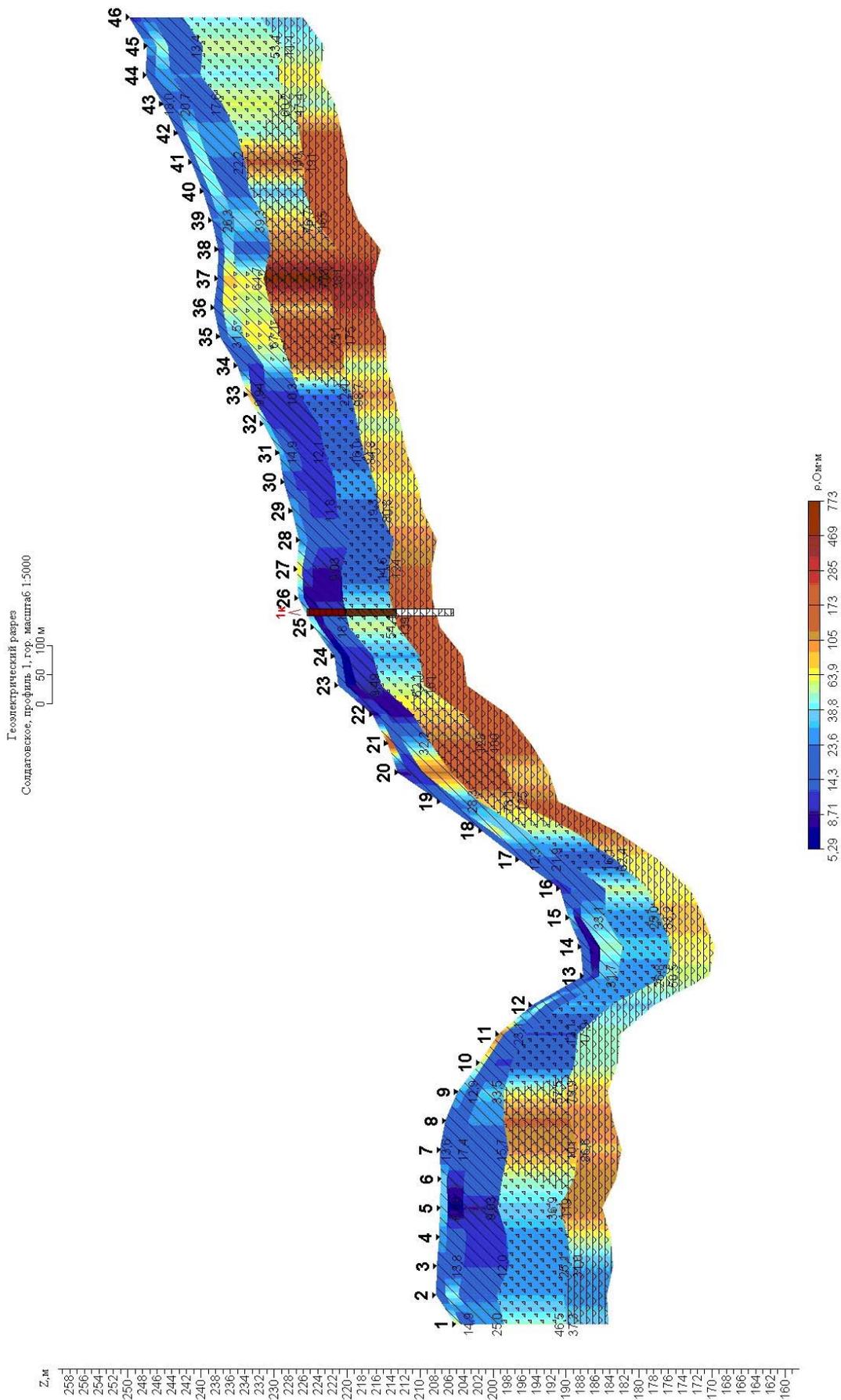


Рисунок 4.4. Геолого-геоэлектрический разрез, пикеты 1 – 46

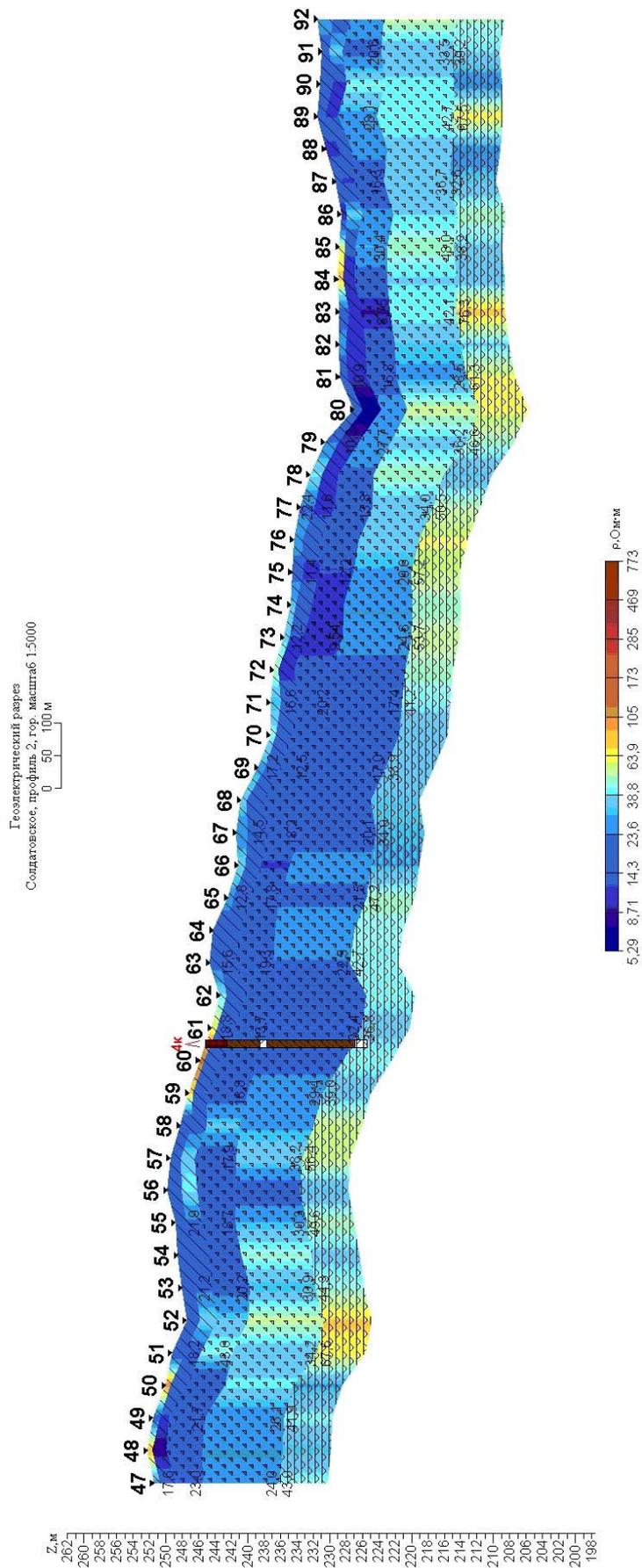


Рисунок 4.5. Геолого-геоэлектрический разрез, пикеты 47 – 92

С увеличением глубины сопротивления пород закономерно возрастают, что свидетельствует о литологической смене грунтов, уменьшении водонасыщенности, глинистости отложений. На глубине порядка 10 м появляются области повышенного сопротивления, характеризующие возможное появление кровли карстующихся пород. Наиболее высокоомные области (70-713 Ом·м) наблюдаются в районе ПК ВЭЗ 5-9, 18-42. Участки пониженных значений сопротивлений в пределах толщи могут характеризовать как увеличение мощности обвальнo-карстовых отложений, так и ослабленную структуру карстующихся пород, заполнение трещин глинистым материалом покровных отложений.

Согласно [273] в гидрогеологическом строении территории, к которой приурочен изыскиваемый участок, принимают участие подземные грунтовые воды аллювиальных и элювиально-делювиальных отложений, а также подземные трещинно-карстовые воды нижнепермских отложений. Обвальнo-карстовая толща обводнена слабо.

Глубина залегания грунтовых вод по району колеблется от 0,2 м до 11,3 м. Подземные воды аллювиальных отложений приурочены к долине р. Уяс, где в условиях перекрытия делювиальными отложениями, грунтовые воды образуют единый горизонт. Водовмещающими породами являются суглинки. Подземные воды, приуроченные к аллювиально-делювиальным отложениям, вскрыты скважинами №№ 6, 7 и 8 на участке перехода трассы через р. Уяс в слое мягкопластичных суглинков на глубинах 0,2-1,5 м. Воды безнапорные.

Подземные воды элювиально-делювиальных отложений распространены в исследуемом районе неповсеместно и развиты главным образом на склонах долин рек, в оврагах, логах, водоразделах. Водовмещающие породы – суглинки, часто с включениями дресвяно-щебенистого материала. Грунтовые воды, приуроченные к элювиально-делювиальным отложениям, встречены в скважине № 1 на глубине 0,5 м у точки врезки проектируемого водовода в существующие коммуникации. Кроме того, в северной части трассы встречены мягкопластичные элювиальные суглинки, однако подземные воды в процессе бурения скважин здесь не установились.

Химический состав грунтовых вод отличается несколько повышенной минерализацией (0,56-0,94 г/дм³) и гидрокарбонатно-кальциевым, реже сульфатно-гидрокарбонатно-магниевым составом. Наличие грунтовых вод сульфатного состава объясняется либо притоком в элювиально-делювиальную толщу карстовых вод, либо выщелачиванием гипсов и ангидритов элювия и неоген-четвертичной толщи. Грунтовые воды агрессивны к гипсам, ангидритам и доломитам и неагрессивны к известнякам. Дефицит насыщения сульфатом кальция при температуре 5°С равен 1,23-1,59.

Подземные воды нижнепермских отложений представлены водоносной иренской сульфатно-карбонатной серией. Иренские отложения водоносны только в месте выхода их на

поверхность, с погружением под более молодые породы они, как правило, становятся водоупором. Воды иренских отложений распространены спорадически. Глубина залегания уровня карстовых вод составляет 25,0-45,0 м. Глубина залегания подошвы вод иренского горизонта колеблется в пределах 45,0-90,0 м. В пределах изыскиваемого участка трассы карстовые воды разгружаются нисходящими и восходящими источниками в рр. Уяс, Егашка и Куклеян. По химическому составу трещинно-карстовые воды выше эрозионного вреза сульфатно-кальциевые, сульфатно-гидрокарбонатные с минерализацией до 3-5 г/дм³. В 50 м выше по течению в р. Уяс впадает подземная река с минерализацией 2,47 г/дм³, выходящая на поверхность в 100 м севернее из гипсоангидритового карстового массива. Трещинно-карстовые воды в основном неагрессивны к гипсам, ангидритам известнякам и агрессивны к доломитам. Дефицит насыщения сульфатом кальция их при температуре 5°С изменяется от 0,1 до 0,3.

Согласно табл. 33 [7], рассматриваемая территория относится ко II типу по потенциальной подтопляемости. В периоды снеготаяния и дождей возможно повышение уровня грунтовых вод в суглинках и в пониженных частях рельефа на 0,2-1,5 м выше замеренных.

Физико-механические свойства грунтов, залегающих на участке трассы, изучались в грунтовой лаборатории согласно приложению М СП [15]. Для этого в полевых условиях осуществлялось опробование грунтов, которое производилось равномерно по площади и по глубине. Всего было отобрано 58 проб грунтов ненарушенного сложения, 21 из которых представлены крупнообломочными грунтами. Механические характеристики дисперсных глинистых грунтов изучались в процессе их испытаний в компрессионных и сдвиговых приборах. Оценка механических характеристик крупнообломочных грунтов произведена по методике В.И. Федорова, разработанной в институте ДальНИИС Госстроя СССР [6], исходя из значений характеристик их физических свойств. Прочностные характеристики свойств при ее применении оценивались для условий неконсолидированного среза.

Карстологические условия в пределах участка проектируемой трассы водовода изучались согласно [12, 16, 22]. На исследуемой территории велось полевое описание и картирование всех имеющихся поверхностных проявлений карста. Изучались условия и закономерности распространения карстопроявлений в пространстве, оценивался их тип, характер образования и интенсивность. Рассматривались возможные влияния техногенных воздействий на активизацию карста.

Исследуемый участок характеризуется высокой степенью закарстованности и распространением поверхностных и подземных карстовых форм. На площади 2,5 км² было зафиксировано 238 поверхностных карстопоявлений – воронок, 235 из которых образуют группы (поля) воронок (рисунок 4.6). Наибольшая плотность воронок приурочена к склонам водоразделов и логов рек Егашка и Уяс, характеризующихся близким залеганием и выходом на

дневную поверхность гипсов. Непосредственно в пределах линии проектируемой трассы локализовано 22 карстовые воронки. Распределение закартированных воронок по величине среднего диаметра и глубине приведено на рисунке 4.7. В распределении воронок по диаметрам ярко выражены два максимума, приуроченных к значениям 3-5 м и 15-25 м и характерные для молодых и древних воронок соответственно.

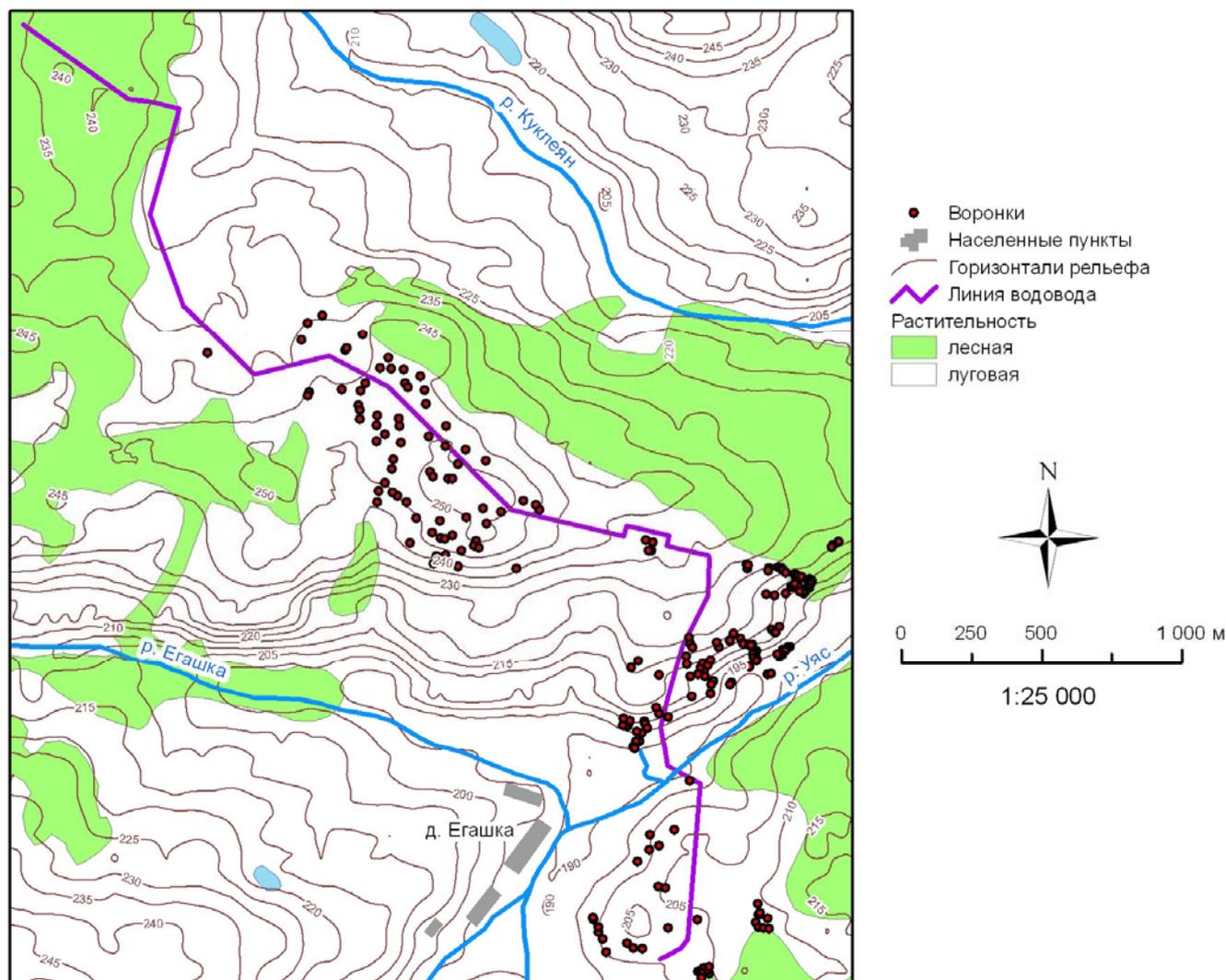


Рисунок 4.6. Схема закартированных поверхностных карстопроявлений

Подземная закарстованность характеризуется наличием в кавернозных гипсах полостей как открытых, так и заполненных суглинистым материалом со щебнем и дресвой гипса, а также ослабленных раздробленных зон. Мощность зоны интенсивного карстообразования по объектам-аналогам составляет около 20 м. Ниже карст затухает, карстовые полости в ходе бурения скважин не вскрыты. По совокупности ареолов-маркеров – унаследованности области пониженных сопротивлений в более глубокие высокоомные горизонты, латеральной изменчивости свойств среды – определено предположительное наличие ослабленных зон в районе ПК ВЭЗ 1-4, 10-17, 27-33 на глубине 10 м, ПК ВЭЗ 43-54, 74-85 на глубине 20 м. Ослабленные зоны представлены глинистым материалом с включением крупнообломочных

частиц, вероятно карстово-обвального происхождения. Начиная с глубин 25-30 м в районе ПК ВЭЗ 9, 10, 18, 20 наблюдаются аномалии низких значений сопротивления, предположительно обусловленные повышенным содержанием глинистого материала в зоне перехода обвально-карстовых отложений в трещиноватые и выветрелые сульфатно-карбонатные породы.

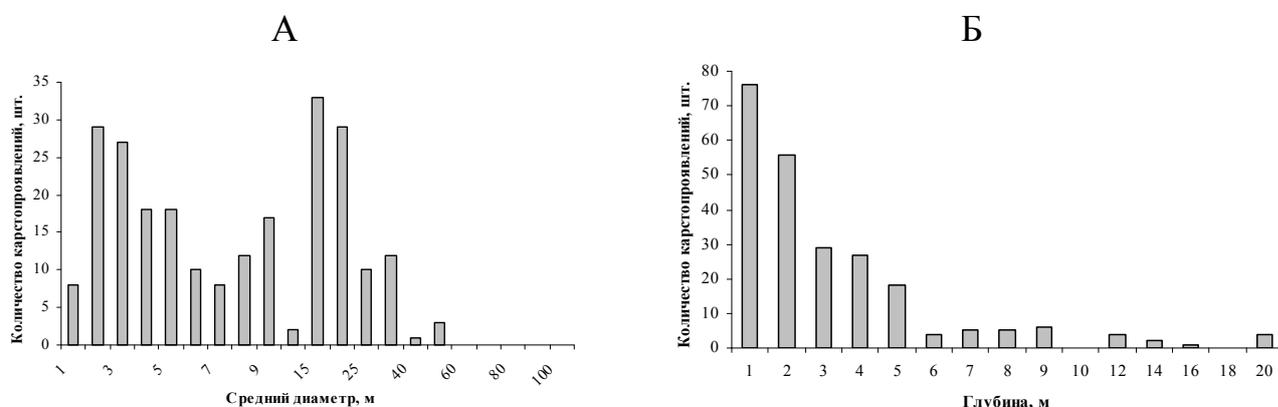


Рисунок 4.7. Распределение карстовых воронок по величине среднего диаметра (А) и глубине (Б)

Нормативная оценка карстоопасности осуществлена по поверхностным карстовым формам (воронкам) в результате расчета интенсивности их образования и оценки средних диаметров:

- в пределах всей исследуемой территории;
- дифференцировано для отдельных участков с учетом предварительно проведенного инженерно-карстологического районирования.

Инженерно-карстологическое районирование исследуемой территории проведено согласно СП [16] (п. 5.2.11) с учетом основных условий, степени и характера развития карста. В его основу положены:

- 1) структурно-тектонические условия;
- 2) геоморфологические и гидрологические условия;
- 3) геолого-гидрогеологические условия;
- 4) инженерно-геологические условия;
- 5) характер подземной закарстованности.

В результате районирования было выделено 8 районов, относительно однородных в отношении выше обозначенных пяти условий. Дополнительно выделенные районы были подразделены на ряд подрайонов, полученных в результате наложения на них прямоугольной сети с размером квадрата 500x500 м (рисунок 4.8, А). В рамках подрайонов расчетным путем оценивались интенсивность провалообразования и средние диаметры попавших в их пределы воронок.

Ввиду отсутствия данных многолетних наблюдений за процессом провалообразования на исследуемой территории интенсивность провалообразования (СП [16], табл. 5.1) оценена с учетом времени их образования принятым равным 100 годам. Данный временной интервал соответствует предельному сроку службы большинства проектируемых зданий и сооружений. При расчетах данного показателя во внимание взяты только карстовые воронки.

В результате оценки карстоопасности нормативным способом выделены 4 участка, характеризующихся следующими категориями устойчивости: I-B, II-B, II-B и V-Г (рисунок 4.8, Б).

Участок категории устойчивости I-B приурочен к относительно крутому левобережному склону р. Уяс, где карстующиеся породы залегают на относительно небольших глубинах (до 10,0 м). Данный участок характеризуется высокой плотностью карстопроявлений коррозионного и провального генезиса. Характерной особенностью закартированных воронок является наличие поноров на дне и обнажений коренных гипсов в бортовых частях.

Участок категории устойчивости II-B относится к водораздельной части рр. Уяс, Егашка и Куклян. По данным бурения и геофизических исследований методом вертикального электромагнитного зондирования карстующиеся породы (гипсы и ангидриты) залегают здесь на глубинах, превышающих 10,0-15,0 м. Карстопроявления представлены провальными воронками, нередко достигающими значительных диаметров (более 30,0 м). Две такие воронки расположены в непосредственной близости от линии проектируемой трассы. Основная часть воронок локализована в пределах ПК ВЭЗ 20-30, 42-65. В районе ПК ВЭЗ 25-31 вдоль линии трассы воронки практически не встречаются, однако широко развиты в залесенной части.

Участок категории устойчивости II-B приурочен к правобережной части р. Уяс. Непосредственно вдоль линии трассы карстовые формы не развиты. Однако группы воронок и одиночные карстопроявления закартированы в 60-70 м западнее и в 200 м восточнее линии трассы. Непосредственно у точки врезки в существующий водовод в лесном массиве отмечены древние карстовые воронки со следами повторной активизации (поваленные и накоренившиеся деревья), на открытой местности развиты заболоченные понижения эллипсовидной формы в плане и чашеобразной в профиле.

Участки с категориями устойчивости V-Г локализованы в районе поймы р. Уяс а также в глубине левобережного водораздельного пространства рр. Уяс, Егашка и Куклян. Карстующиеся отложения при движении в северо-западном направлении вдоль проектируемой трассы постепенно погружаются и, по данным ВЭЗ, залегают на глубинах, превышающих 30,0 м. На этих участках поверхностные карстопроявления отсутствуют. В районе ПК ВЭЗ 73 отмечено незначительное локальное оседание земной поверхности, вероятно карстовой природы.

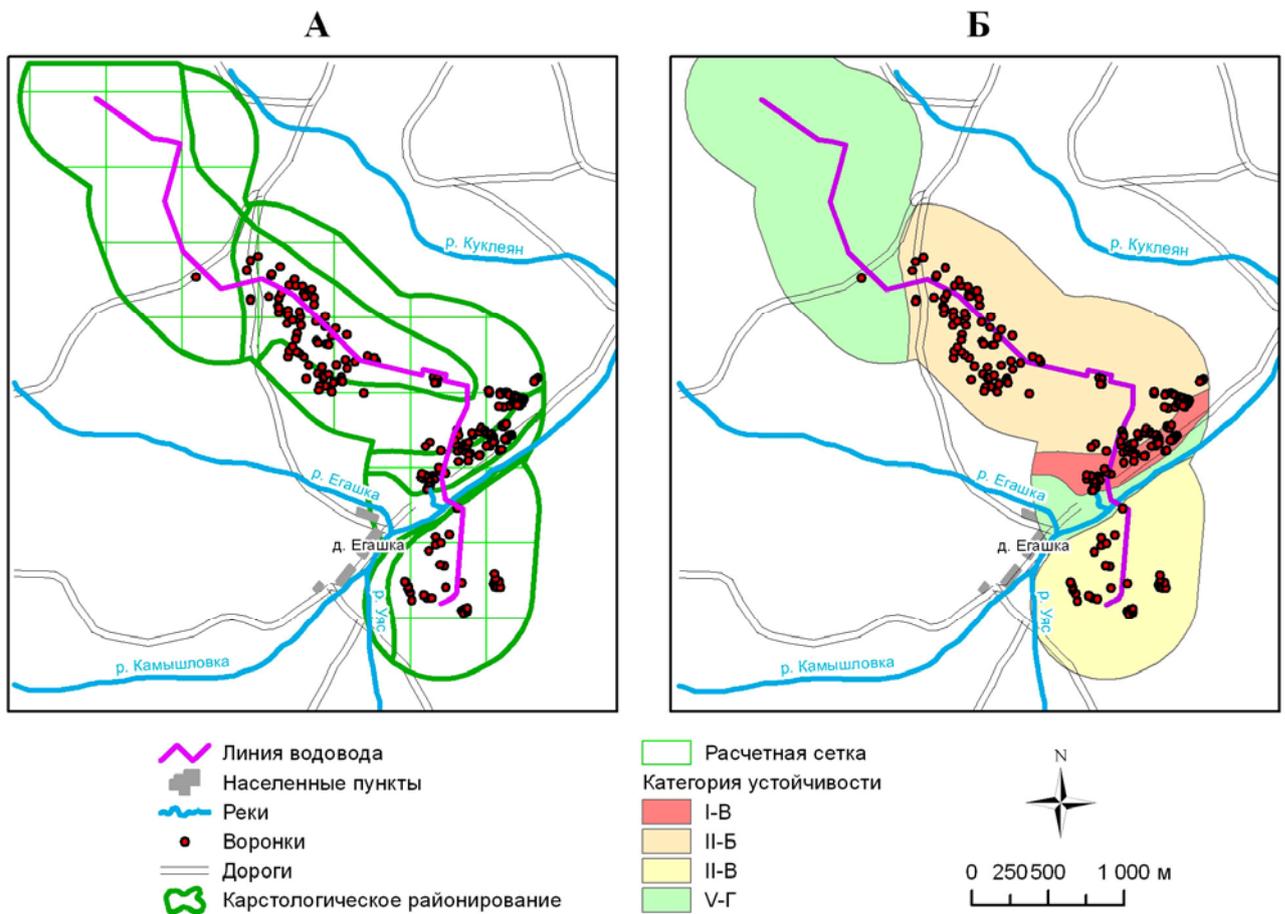


Рисунок 4.8. Расчетные участки, выделенные по результатам карстологического районирования по природным условиям развития карста (А) и оценка карстоопасности участка трассы водовода по нормативной методике (Б)

Интегральная оценка карстоопасности трассы водовода осуществлена на всем ее протяжении. В ее основу положены данные о природном строении изыскиваемой территории, формализованные в виде набора показателей, регламентированных методикой. В качестве опорных точек для установления значений показателей природного строения используются скважины, пройденные в ходе изысканий (таблица 4.1). Показатели структурно-тектонического строения St и геоморфологических Ge условий оценивались непрерывно по площади в результате построения растровых картографических моделей их изменчивости. Значения с растровых моделей снимались в точках локализации скважин. Показатели геологической G , гидрогеологической Hg и инженерно-геологической Eg групп определены в ходе анализа буровых колонок скважин. Положение границ различных по генезису и литологии слоев с целью дальнейшего установления их мощностей дополнительно определялось с учетом результатов геофизических исследований, проведенных в границах участка трассы.

Численные значения показателей гидрогеологической группы оценены только по 4 скважинам, в период проведения изысканий в которых были вскрыты подземные воды, приуроченные к грунтовому водоносному горизонту. Среди рассматриваемых

гидрогеологических показателей в анализе участвовали только два из них – минерализация подземных вод и глубина установления грунтовых вод. Положение карстовых вод не определялось в виду специфики решаемой задачи (изыскания под водовод) и связанной с ней ограниченной глубиной исследования.

Таблица 4.1. Показатели природного строения и их значения в точках локализации скважин*

Номер скважины	<i>St</i>				<i>G</i>			<i>Hg</i>		<i>Ge</i>				<i>Eg</i>		
	L_l	M_l	B_l	R_l	m_p	m_o	m_{NO}	H_o	M	β	ΔH	U	$\tan \alpha$	E_0	φ	c
с-1	3,52	1,40	0,19	37,1	15,9	6,7	9,2	0,5	0,56	2,0	13,4	564,3	0,020	14,28	17,29	9,62
с-2	3,48	0,20	0,14	142,3	16,2	7,5	8,7			2,4	15,5	509,1	0,030	11,20	16,00	13,14
с-3	4,92	3,16	0,16	12,9	11,3	8,3	3,0			1,4	19,2	312,3	0,060	6,50	14,00	17,79
с-4	6,08	6,80	0,23	14,1	7,8	5,1	2,7			1,6	16,8	199,2	0,080	7,12	14,10	15,98
с-5	7,04	10,12	0,30	7,0	10,0	3,6	6,4			5,2	6,1	88,9	0,070	11,06	14,48	13,58
с-6	7,76	11,72	0,13	12,5	10,7	4,2	6,5	0,3	0,76	3,3	2,1	20,1	0,110	12,13	14,85	12,06
с-7	7,92	12,08	0,09	15,0	11,7	5,0	6,7	0,2	0,94	1,8	1,1	2,8	0,330	8,99	15,27	10,17
с-8	7,92	12,32	0,08	8,1	11,8	5,1	6,7	1,5	0,83	0,7	0,8	33,1	0,020	8,99	15,30	8,76
с-9	7,64	12,16	0,13	97,0	10,0	5,1	4,9			8,0	6,7	109,0	0,060	16,40	15,60	10,20
с-10	7,04	10,64	0,13	27,0	6,0	5,0	1,0			4,4	20,8	275,1	0,080	13,20	14,60	10,32
с-11	6,68	9,84	0,11	17,6	12,6	5,9	6,7			2,3	34,1	378,1	0,090	15,54	15,67	9,32
с-12	5,84	7,64	0,06	52,2	11,5	5,9	5,6			1,8	41,3	564,7	0,070	18,78	16,97	8,33
с-13	5,52	4,96	0,09	46,4	6,6	3,6	3,0			6,3	45,1	704,9	0,060	18,81	17,30	7,30
с-14	5,96	5,88	0,09	6,3	6,4	6,3	0,1			0,6	48,2	815,1	0,060	15,39	16,70	6,59
с-15	6,96	11,76	0,12	5,8	17,8	7,3	10,5			3,9	61,7	865,7	0,070	18,30	17,50	6,70
с-16	7,28	17,16	0,49	159,4	15,0	2,5	12,5			2,6	61,5	843,2	0,070	14,28	15,19	11,50
с-17	6,36	15,48	0,48	141,1	16,0	3,6	12,4			2,3	60,5	850,7	0,070	19,09	17,09	7,61
с-18	4,68	8,04	0,46	87,3	15,9	2,9	13,0			1,0	59,3	889,5	0,070	14,92	16,86	5,40
с-19	3,28	3,84	0,44	30,4	17,0	3,2	13,8			1,0	56,2	1013,4	0,060	8,29	11,33	12,70
с-20	1,52	0,16	0,43	240,4	17,0	4,3	12,7			1,0	52,3	1102,6	0,050	8,79	12,69	11,13
с-21	2,12	0,96	0,46	165,3	17,6	4,9	12,7			1,3	48,5	1089,3	0,040	8,23	13,32	10,64
с-22	3,36	3,08	0,58	2,5	16,2	4,7	11,5			1,6	45,5	1039,7	0,040	8,35	14,63	9,24
с-23	4,76	5,64	0,70	79,2	18,1	5,1	13,0			0,8	42,9	947,8	0,050	8,20	15,10	9,21
с-24	5,40	6,32	0,36	30,9	16,1	4,6	11,5			2,8	40,7	876,9	0,050	8,11	14,62	11,29
с-25	5,84	7,00	0,25	125,8	16,2	4,8	11,4			1,7	38,8	730,1	0,050	7,28	13,39	14,91
с-26	5,52	5,92	0,16	5,0	16,9	4,3	12,6			1,4	42,8	544,4	0,080	6,47	11,90	19,80
с-27	4,32	3,60	0,18	89,2	19,4	6,1	13,3			4,3	44,2	513,6	0,090	9,65	13,25	15,61
с-28	1,96	0,20	0,37	116,7	26,9	7,8	19,1			2,5	50,9	747,9	0,070	14,20	14,90	9,56
с-29	1,96	0,20	0,30	79,2	34,5	10,9	23,6			0,4	48,0	668,7	0,070	14,25	15,05	9,52
с-30	2,52	0,60	0,21	26,3	36,6	12,7	23,9			0,9	48,5	570,7	0,080	13,97	15,49	9,23
с-31	2,28	0,20	0,26	5,0	38,5	13,0	25,5			1,8	50,0	651,4	0,080	13,55	15,02	9,43
с-32	1,80	0,20	0,36	168,6	39,0	12,5	26,5			1,7	49,9	712,6	0,070	12,90	15,60	10,98
с-33	1,76	0,20	0,36	211,4	38,1	14,0	24,1			0,2	51,1	788,9	0,060	13,45	15,59	9,93
с-34	1,80	0,20	0,36	143,9	41,6	13,5	28,1			0,5	49,4	651,8	0,080	13,61	15,19	11,60
с-35	2,08	0,24	0,28	43,8	39,1	13,0	26,1			0,3	49,0	578,0	0,080	14,79	14,04	11,36
с-36	2,76	1,08	0,21	64,1	40,7	11,6	29,1			1,4	47,5	506,2	0,090	13,82	14,68	10,85
с-1к	6,60	9,08	0,12	31,8	11,4	5,3	6,1			3,7	33,2	363,3	0,090	14,78	15,40	9,40
с-2к	3,80	5,00	0,37	78,5	17,9	2,9	15,0			0,8	56,4	966,9	0,060	10,96	13,58	9,49

* Полные наименования групп и показателей природного строения приведены в таблице 3.2

Значения показателей инженерно-геологической группы определялись в пределах каждой анализируемой скважины путем расчета их среднего значения, устанавливаемого по отобраным из нее пробам грунта. Данная процедура не дает точной оценки механических характеристик свойств грунтов покровной толщи отложений, однако позволяет ориентировочно проследить их колебания и отклонения в сторону увеличения или уменьшения в различных точках пространства. Например, в пойменной части р. Уяс таким способом были получены пониженные значения удельного сцепления, что свидетельствует о повышении «песчанности» разреза. В пределах сильно закарстованного левобережного склона р. Уяс, а также в глубине водораздела,

ближе к концу трассы, увеличение мощности крупнообломочного элювия проявляется в повышении модулей общей деформации грунтовой толщи.

Интегральная оценка карстоопасности заключалась в расчете четырех параметров опасности – интервальной Pab , полной интервальной Pb и относительной p вероятностей образования карстовых форм, а также их среднего индекса морфометрии I . Для начала значения этих характеристик были рассчитаны для каждого из отдельных показателей природного строения с учетом установленных зависимостей, сведенных в таблице 3.13. Далее они были усреднены в рамках каждой из групп. Итоговые интегральные значения параметров опасности по всем группам показателей природных условий рассчитаны согласно интегральной модели (формула 3.17). Поиск оптимального решения интегральной модели в каждом конкретном случае осуществлялся в соответствии с рекомендуемым методикой алгоритмом. Оценка прогнозных значений морфометрических параметров провалов (средний диаметр), полостей (высота) и зон дробления (вертикальная мощность) осуществлена в результате умножения индексного значения морфометрии на их максимумы, установленные в пределах пилотных территорий и приведенные в таблице 3.10. Прогнозное значение глубины провалов определено по корреляционной зависимости, также полученной в ходе комплексного анализа данных в пределах пилотных территорий Пермского края и приведенной в таблице 3.5.

Расчету интервальной вероятности Pab предшествовало предварительное районирование трассы с целью выделения наиболее однородных в природном отношении площадей, в пределах которых определялось значение Pab . Выделение районов осуществлено по значениям исследуемых показателей природного строения. В отдельный район выделялись такие площади, в пределах которых средний групповой коэффициент вариации V_g интегральных функций Fb , установленных по значениям показателей природного строения, не превышал 0,3 (таблица 4.2). Нормативная категория устойчивости по интенсивности провалообразования оценена по значениям Pab в соответствии с таблицей 3.14.

Таблица 4.2. Результат районирования трассы и расчета интервальной вероятности Pab образования карстовых форм

№ района	Скважины, пройденные в пределах района	Коэффициент вариации V_g	Интегральная интервальная вероятность Pab	Нормативная категория устойчивости по интенсивности провалообразования λ_{Pab}
1	1, 2, 3, 4, 5	0,22	0,115	III
2	6, 7	0,13	0,036	V
3	8, 9, 10, 11, 12, 1к	0,27	0,173	II
4	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 2к	0,29	0,218	II
5	20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	0,17	0,103	III
6	28, 30, 31, 32, 36	0,14	0,088	IV
7	29, 33, 34, 35	0,08	0,048	V

Интегральный расчет параметров Pb , p и I произведен в точке локализации каждой из рассматриваемых скважин. Нормативные категории устойчивости по интенсивности провалообразования установлены по значениям параметров Pb и p с учетом классификации, приведенной в таблице 3.14. Прогнозные значения средних диаметров провалов вычислены из полученных интегральных индексов морфометрии путем их умножения на региональный максимум, установленный для провалов (таблица 3.10). Категория устойчивости по средним диаметрам провалов определена по их прогнозным значениям с учетом классификации, приведенной в СП [16]. Результаты расчета интегральных параметров (Pb , p и I), итоговые нормативные категории устойчивости, установленные по их значениям, а также прогнозные морфометрические параметры карстовых форм приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Результат интегральной оценки полной интервальной Pb и относительной p вероятностей, а также индекса морфометрии I карстовых форм в точках локализации скважин

Номер скважины	Полная интервальная вероятность		Относительная вероятность		Индекс морфометрии	Средний диаметр, м	Категория устойчивости по величине среднего диаметра	Глубина провала, м	Высота полости, м	Мощность зоны дробления, м
	Pb	λ_{Pb}	p	λ_p						
c-1	0,39	IV	0,50	V	0,07	6,71	B	2,08	1,21	2,11
c-2	0,39	IV	0,71	III	0,06	6,03	B	1,87	1,09	1,90
c-3	0,41	III	0,70	III	0,05	4,59	B	1,43	0,83	1,45
c-4	0,45	III	0,72	III	0,04	3,94	B	1,22	0,71	1,24
c-5	0,43	III	0,72	III	0,04	3,69	B	1,15	0,66	1,16
c-6	0,35	IV	0,50	V	0,04	3,92	B	1,22	0,71	1,24
c-7	0,31	IV	0,44	V	0,04	4,03	B	1,25	0,73	1,27
c-8	0,28	V	0,42	V	0,04	4,11	B	1,28	0,74	1,29
c-9	0,44	III	0,78	III	0,04	3,87	B	1,20	0,70	1,22
c-10	0,41	III	0,72	III	0,05	4,64	B	1,44	0,83	1,46
c-11	0,60	II	0,80	III	0,05	5,44	B	1,69	0,98	1,71
c-12	0,68	II	0,84	II	0,06	5,50	B	1,71	0,99	1,73
c-13	0,46	III	0,79	III	0,06	5,88	B	1,83	1,06	1,85
c-14	0,44	III	0,74	III	0,06	5,73	B	1,78	1,03	1,81
c-15	0,61	II	0,80	III	0,05	4,86	B	1,51	0,87	1,53
c-16	0,69	II	0,87	II	0,06	5,74	B	1,78	1,03	1,81
c-17	0,74	I	0,88	II	0,07	6,71	B	2,09	1,21	2,12
c-18	0,76	I	0,90	II	0,06	5,99	B	1,86	1,08	1,89
c-19	0,46	III	0,82	II	0,07	7,21	B	2,24	1,30	2,27
c-20	0,20	V	0,77	III	0,05	5,29	B	1,64	0,95	1,67
c-21	0,22	V	0,75	III	0,07	6,88	B	2,14	1,24	2,17
c-22	0,22	V	0,75	III	0,06	6,19	B	1,92	1,11	1,95
c-23	0,46	III	0,83	II	0,06	6,06	B	1,88	1,09	1,91
c-24	0,47	III	0,83	II	0,05	5,10	B	1,58	0,92	1,61
c-25	0,75	I	0,87	II	0,05	4,90	B	1,52	0,88	1,54
c-26	0,74	I	0,83	II	0,05	4,59	B	1,43	0,83	1,45
c-27	0,65	II	0,83	II	0,05	5,17	B	1,61	0,93	1,63
c-28	0,42	III	0,75	III	0,07	7,44	B	2,31	1,34	2,34
c-29	0,39	IV	0,66	IV	0,09	8,72	B	2,71	1,57	2,75
c-30	0,41	III	0,71	III	0,08	7,97	B	2,48	1,43	2,51
c-31	0,24	V	0,70	IV	0,08	8,01	B	2,49	1,44	2,52
c-32	0,25	V	0,70	III	0,08	8,39	B	2,61	1,51	2,64
c-33	0,26	V	0,61	IV	0,10	9,82	B	3,05	1,77	3,09
c-34	0,26	V	0,65	IV	0,09	9,07	B	2,82	1,63	2,86
c-35	0,39	IV	0,63	IV	0,09	8,83	B	2,74	1,59	2,78
c-36	0,43	III	0,72	III	0,08	8,03	B	2,50	1,45	2,53
c-1к	0,62	II	0,80	II	0,05	4,51	B	1,40	0,81	1,42
c-2к	0,67	II	0,85	II	0,06	6,36	B	1,97	1,14	2,00

На рисунке 4.9 отражены результаты интегральной оценки карстоопасности территории прохождения трассы водовода, осуществленной по различным параметрам. Как видно из рисунка, 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 ограничено или вовсе отсутствуют (северная часть трассы водовода).

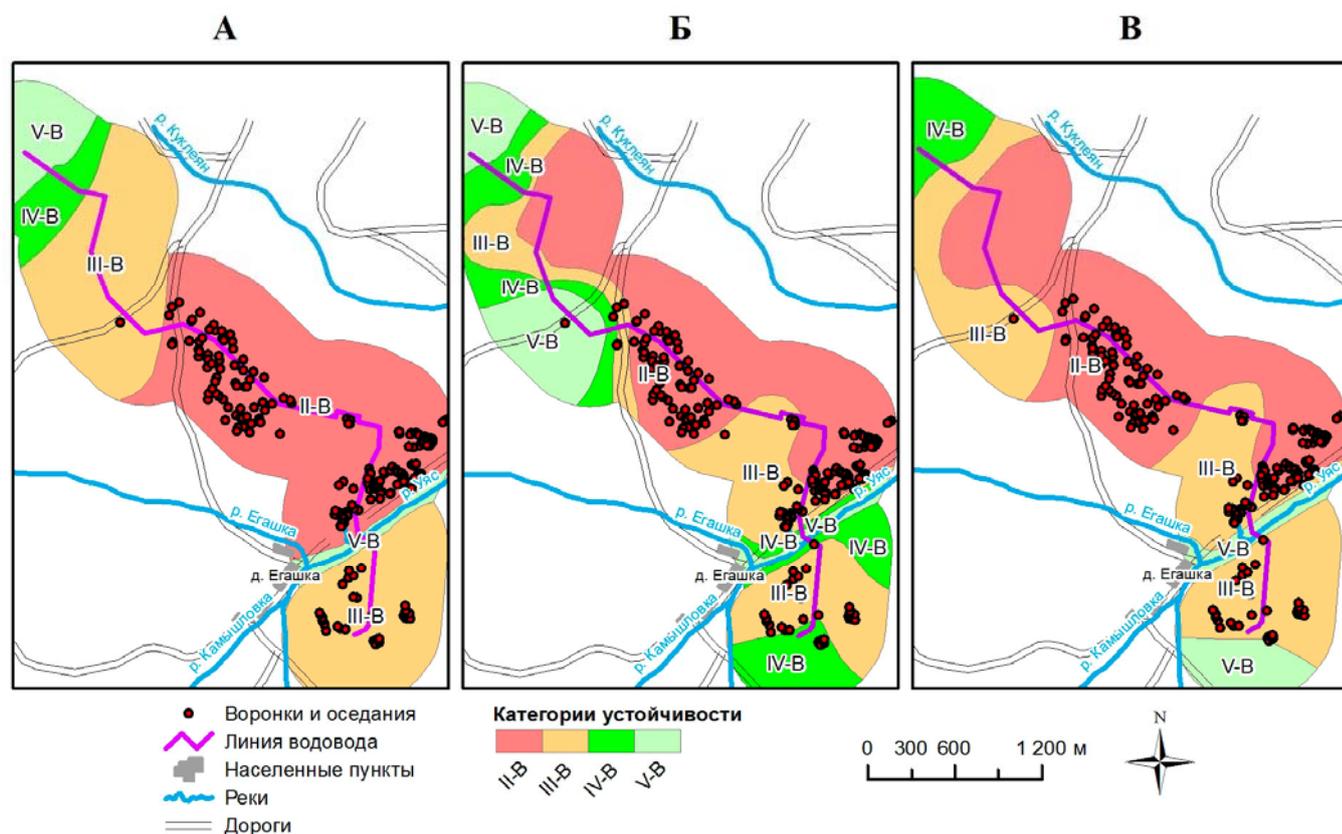


Рисунок 4.9. Интегральная оценка карстоопасности участка трассы водовода: А – по параметрам $Pab - d$; Б – по параметрам $Pb - d$; В – по параметрам $p - d$

В процессе сравнительного анализа карт, построенных с применением нормативного и интегрального подходов, несмотря на различие некоторых категорий устойчивости, были выявлены характерные общие моменты. Так, на всех моделях участки наибольшего развития воронок относятся к категории устойчивости II по интенсивности провалообразования. Северная оконечность трассы водовода характеризуется относительно слабым развитием карста, что отражается в присвоении этому участку, соответственно, V и IV, реже III категорий устойчивости разными моделями. Следует заметить, что в случае интегральных оценок выделяются участки с III категорией, окаймляющие территории II категории устойчивости. При оценке нормативным способом III категория устойчивости не выделена вовсе. В пределах

закарстованного левобережного склона р. Уяс с применением нормативного подхода выделена полоса (коренной склон), характеризующаяся I категорией по интенсивности провалообразования, в то время как пойменная часть р. Уяс отнесена к категории V – относительно устойчивой. На всех интегральных моделях пойменная область также характеризуется V категорией устойчивости, а на модели P_b дополнительно выделяется окаймляющая область, отнесенная к IV категории. Однако коренной склон на разных интегральных моделях классифицируется по-разному. На интегральной модели P_{ab} рассматриваемый участок приурочен ко II категории устойчивости, в то время как на моделях P_b и *p* здесь выделяются категории III и II.

При оценке устойчивости по величине среднего диаметра нормативным и интегральным методами на фоне общей тенденции также наблюдаются некоторые различия. Так, в пределах трассы водовода при оценке интегральным способом участки с величиной среднего диаметра провалов менее 3 м (категория Г) не обособляются, в то время как при оценке по нормативной методике малые диаметры провалов прогнозируются в пределах пойменной части р. Уяс и в глубине водораздела. Если в районе поймы по результатам интегрального моделирования средние прогнозируемые диаметры провалов максимально близки к категории Г, то при удалении вглубь водораздела интегральная оценка, наоборот, указывает на повышение среднего диаметра новообразующихся провалов. На северо-западной оконечности трассы водовода различие в категории устойчивости при прогнозировании нормативным и интегральным методами диаметрально противоположное. По нашему мнению в данной ситуации более верный характер носит прогноз, осуществленный интегральным методом, т.к. он отталкивается от объективных внутренних зависимостей функционирования карстового массива, а не от вульгарной логики, базирующейся на отсутствии карстовых форм. В пределах сильнозакарстованной центральной части трассы, наоборот, результаты нормативной и интегральной оценок категорий по величине средних диаметров провалов либо полностью совпадают, либо являются смежными, а реальное различие величин средних диаметров в численном выражении минимальное. Полное совпадение категорий устойчивости по средним диаметрам отмечается в начале трассы, где она проходит по правобережному склону р. Уяс.

Наиболее наглядно кондиционность результатов оценки, полученных с применением нормативного и интегрального подходов, можно проследить из статистической характеристики закартированных карстовых воронок, локализованных в пределах наиболее карстоопасных участков, выделенных на протяжении трассы водовода (таблица 4.4). В этой же таблице приведены прогнозируемые величины подземных карстовых форм, локализованных в пределах участков с различной степенью карстоопасности, определенные согласно данным таблицы 3.10 и рисунка 3.8 с учетом известных средних диаметров карстовых воронок.

Таблица 4.4. Характеристика карстоопасных участков, установленных по нормативной методике и интегральным способом

Статистическая характеристика	По всему участку трассы	Участки категорий устойчивости, выделенные									
		по нормативной методике			интегральным способом						
					по параметру P_{ab}		по параметру P_b			по параметру p	
I-B	II-B	III-B	II-B	III-B	II-B	III-B	IV-B	II-B	III-B		
Площадь территории, км ²	5,84	0,24	2,04	1,12	2,45	2,37	2,13	1,59	1,07	2,55	2,18
<i>Морфометрические параметры карстовых воронок, закартированных в период изысканий</i>											
Количество, шт.	235	75	126	34	201	34	166	60	9	172	63
Средний диаметр, м											
- минимальный	0,8	0,8	1,5	1,0	0,8	1,0	0,8	1,0	1,0	0,8	1,0
- максимальный	48,0	30,0	48,0	28,5	48,0	28,5	48,0	30,0	28,5	48,0	30,0
- средний	9,6	5,0	12,8	8,3	9,9	8,3	9,9	9,1	6,8	9,9	8,8
Глубина, м											
- минимальная	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4
- максимальная	28,0	12,0	28,0	9,0	28,0	9,0	28,0	20,0	9,0	28,0	20,0
- средняя	3,2	2,1	4,1	2,3	3,3	2,3	3,2	3,3	2,0	3,2	3,2
Глубинность, д.е.											
- минимальная	0,04	0,09	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06
- максимальная	2,5	1,36	2,50	0,74	2,50	0,74	2,50	1,36	0,74	2,50	1,36
- средняя	0,38	0,45	0,36	0,35	0,39	0,35	0,38	0,40	0,48	0,37	0,42
Площадь, м ²											
- минимальная	0,5	0,5	1,6	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,8	0,5	0,8
- максимальная	1808,6	678,2	1808,6	593,5	1808,6	593,5	1808,6	706,5	593,5	1808,6	706,5
- средняя	131,0	43,9	192,9	93,2	137,3	93,2	140,7	110,3	88,3	138,7	109,8
Объем, м ³											
- минимальный	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3
- максимальный	15509,1	2441,7	15509,1	2136,5	15509,1	2136,5	15509,1	5652,0	2136,5	15509,1	5652,0
- средний	451,1	105,8	725	197,6	494,0	197,6	496,4	356,1	248,5	484,2	360,7
<i>Прогнозируемые морфометрические параметры подземных карстовых форм</i>											
Высота полостей, м											
- минимальная	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2
- максимальная	8,6	5,4	8,6	5,1	8,6	5,1	8,6	5,4	5,1	8,6	5,4
- средняя	1,7	0,9	2,3	1,5	1,8	1,5	1,8	1,6	1,2	1,8	1,6
Мощность зон дробления, м											
- минимальная	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
- максимальная	15,1	9,5	15,1	9,0	15,1	9,0	15,1	9,5	9,0	15,1	9,5
- средняя	3,0	1,6	4,0	2,6	3,1	2,6	3,1	2,9	2,1	3,1	2,8

Несмотря на отмеченные различия при оценке и картировании карстоопасности линейного участка трассы водовода с применением нормативного и интегрального подходов следует отметить, что все модели с разных сторон характеризуют некоторую истинную картину существующих в пределах исследуемой территории опасностей, связанных с активизацией карстового процесса. Статистический анализ распространения закартированных карстовых воронок показал, что в случае применения нормативной и интегральной методик их большая часть приходится на наиболее опасные в отношении интенсивности провалообразования 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.

Таким образом, результаты интегральных построений по различным параметрам опасности в случае исследования линейных объектов позволяют получать более объективные картины карстоопасности территории. Принимая во внимание относительную простоту осуществления оценки и необходимость наличия минимального набора данных, ограниченного 10-17 показателями, характеризующими особенности природного строения, интегральную методику можно рекомендовать при оценке карстоопасности линейных объектов в качестве возможной альтернативы существующему нормативному подходу. Кроме того, неоспоримым преимуществом интегральной оценки является возможность одновременного прогнозирования морфометрических характеристик как поверхностных, так и подземных карстовых форм.

4.2. Интегральная оценка карстоопасности площадки строительства поглощающих скважин

В геоморфологическом отношении исследуемая площадка приурочена к области развития поймы и пойменных террас рек Турка, Ирень, Карьевка. Рельеф изыскиваемой территории представляет собой слабовсхолмленную равнину, осложненную карстовыми деформациями. Общий уклон направлен к северо-востоку. Абсолютные отметки поверхности земли в пределах территории района по данным анализа топоплана масштаба 1:100000 и снимков SRTM изменяются в пределах от 129,0 м до 226,0 м (рисунок 4.10, А). Отметки высот в пределах площадки изменяются от 143,0 до 150,0 м в Балтийской системе высот.

В ходе комплексного анализа космоснимков высокого разрешения (портал Kosmosnimki.ru, спутник Bird's Eye, сервисы Bingmaps и Google) в пределах исследуемого участка была выявлена сеть линейных элементов различной природы (рисунок 4.10, Б). Дешифрирование и картирование линеаментов сопровождалось построением карт их линейной плотности и количества пересечений в пределах определенной расчетной площади, удаленности от линеаментов и линеаментной блочности.

С целью изучения геолого-гидрогеологических и инженерно-геологических условий на исследуемой площадке пробурено 38 инженерно-геологических скважин. Условия залегания, состояние и состав карстующихся пород оценивались по архивным карстологическим скважинам, пройденным на территории пос. Карьево ОАО «ВерхнекамГИСИЗ» в феврале 1983 г. (рисунок 4.11).

Бурение скважин проводилось механическим колонковым способом станком УРБ-2А-2 диаметром 127 мм без обсадки. Глубина инженерно-геологических скважин в пределах площадки изменяется от 5,0 до 8,0-12,0 м. Архивные карстологические скважины пробурены до глубины 60,0 м и 40,0 м соответственно.

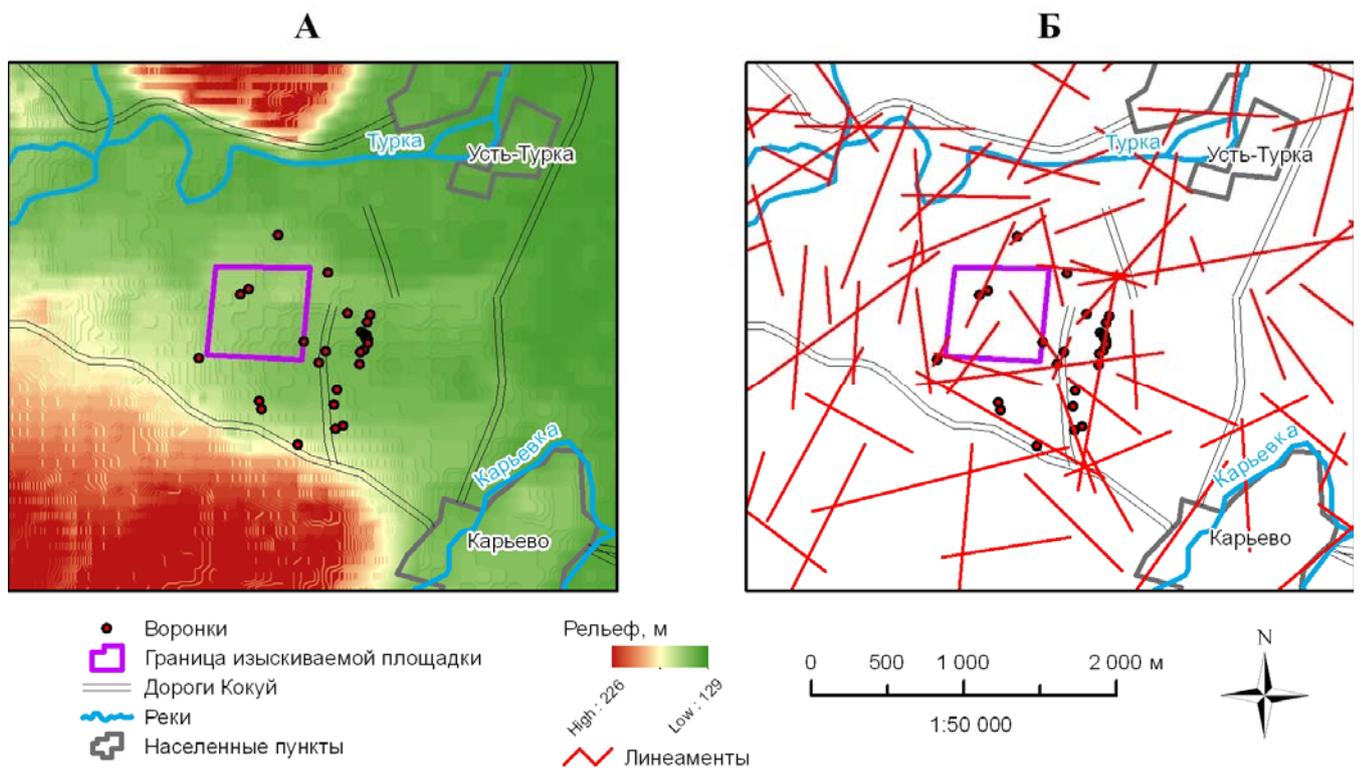


Рисунок 4.10. Особенности строения рельефа (А) и распространение линеаментов (Б) в пределах исследуемой площадки строительства поглощающих скважин

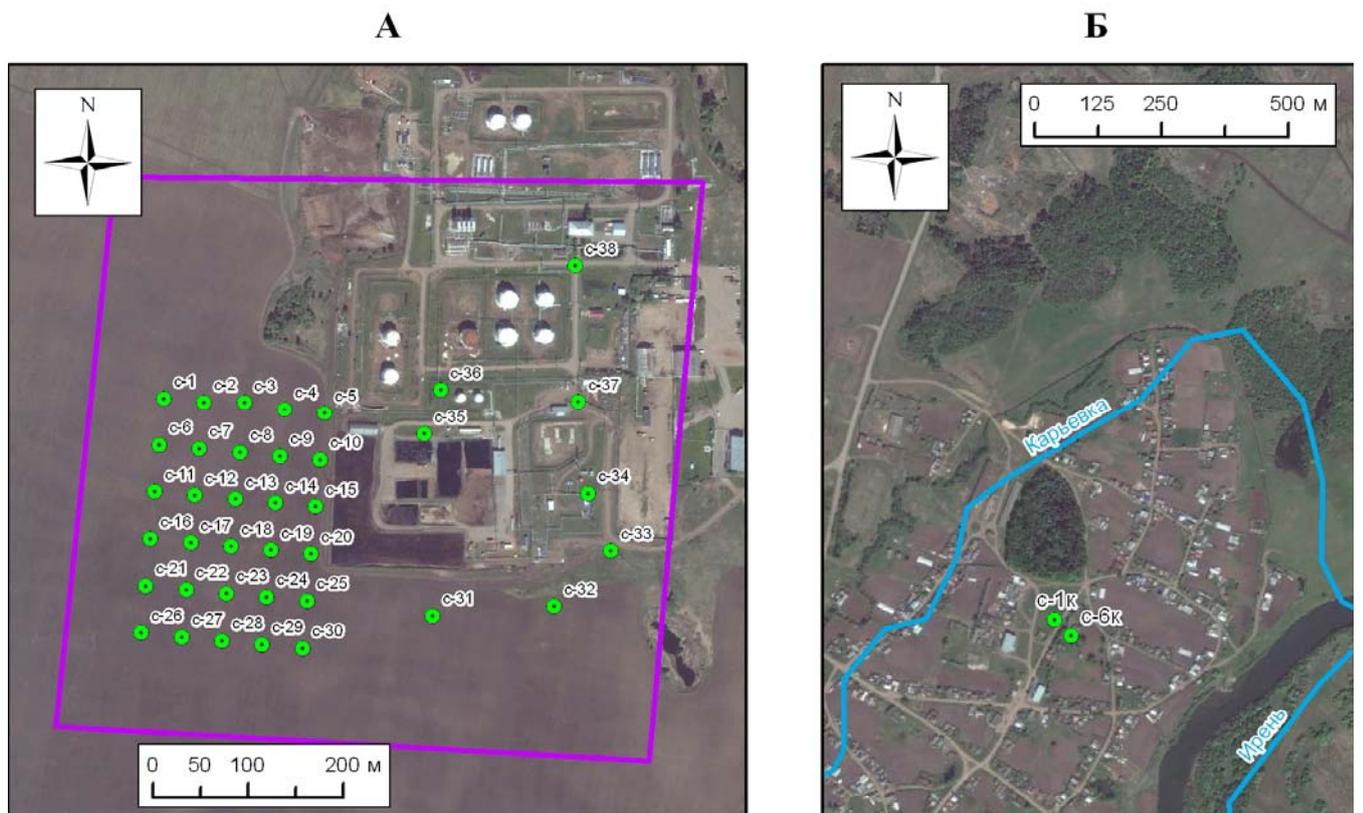


Рисунок 4.11. Расположение инженерно-геологических скважин в пределах изыскиваемой площади (А) и карстологических скважин на территории пос. Карьево (Б) (в качестве основы использован космоснимок Google)

В геологическом строении исследуемой территории принимают участие четвертичные суглинки и крупнообломочные грунты с песчаным и супесчаным заполнителем, неоген-четвертичные обвальнo-карстовые отложения, а также коренные нижнепермские гипсы и ангидриты с прослоями известняков и доломитов.

Четвертичные отложения аллювиального (aQ) и делювиального (dQ) генезиса широко встречаются в разрезе. В пределах пойменной части они представлены суглинками и гравийно-галечниковыми грунтами с песчаным и супесчаным заполнителем. Ниже по разрезу развиты неоген-четвертичные (N-Q) обвальнo-карстовые отложения, сложенные щебенисто-дресвяными грунтами (щебень и дресва гипса, ангидрита, известняка и доломита), реже гравийно-галечниковыми с песчаным, супесчаным и, реже, суглинистым заполнителем. Обвальнo-карстовые отложения широко развиты в разрезе, характеризуются перемешанным и не слежавшимся характером залегания, малой плотностью сложения.

Коренные нижнепермские гипсоангидриты, реже известняки и доломиты иренского горизонта (P_{1ir}) развиты повсеместно под слоем неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений, реже четвертичных аллювиально-делювиальных суглинков и крупнообломочных грунтов. По данным колонок карстологических скважин глубина их залегания в пределах поймы и пойменных террас рр. Турка и Ирень, к которым приурочена исследуемая площадка, составляет 28,0-32,0 м.

Сводный геолого-литологический разрез в пределах исследуемой площадки и прилегающих территорий по данным бурения до глубины 60,0 м следующий (сверху вниз):

Почвенно-растительный слой (pQ) распространен повсеместно мощностью до 0,2-0,3 м.

Техногенные грунты (tQ) имеют локальное распространение и представлены насыпными грунтами: суглинок, щебень гипса до 20-30%, строительный мусор, слежавшийся. Возраст более пяти лет. Мощность 0,2-0,3 м.

Суглинок (adQ) коричнево-красный тугопластичный и полутвердый легкий, реже тяжелый пылеватый с тонкими прослойками песка коричневого, с единичными включениями дресвы, реже щебня известковистых пород. Распространен повсеместно под почвенно-растительным слоем и насыпными грунтами. Мощность 12,0-13,6 м. По данным архивным скважин в кровле суглинков встречаются прослойки глины мощностью до 0,8-1,0 м.

Гравийный грунт (aQ) с супесчаным заполнителем. Гравий и галька кварцево-кремнистого состава. Распространены в пределах поймы под слоем суглинков. Мощность 11,7-12,6 м. В пределах исследуемой площадки гравийные грунты вскрыты на глубину 0,5 м начиная с глубины 11,5 м.

Щебень и дресва (N-Q) известняка, ангидрита с гравием и галькой кварцево-кремнистого состава, заполнителем служит песок полимиктовый. Развита под слоем гравийного грунта. Мощность 2,5-2,8 м.

Известняк (P₁г) серый сильновыветрелый сильнотрещиноватый кавернозный. Каверны на 60-70% не заполнены, остальные выполнены карбонатно-глинистым материалом. Глубина каверн 2-3 см. Вскрыт под слоем неоген-четвертичных отложений. Мощность 3,4-3,5 м.

Гипс (P₁г) серовато-белый сильновыщелоченный сильнотрещиноватый. С глубиной постепенно переходит в ангидрит. Мощность 2,0-2,1 м.

Ангидрит (P₁г) голубовато-серый, слаботрещиноватый, средней крепости, монолитный, вскрыт обеими скважинами. Вскрытая мощность 25,5 м.

Подземные воды на исследуемой площадке скважинами не встречены. По данным архивных буровых скважин грунтовые воды встречены в подошве слоя суглинистых отложений и приурочены к гравийным грунтам с супесчаным заполнителем. Глубина установления грунтовых вод 14,0-14,5 м. Химический состав грунтовых вод характеризуется несколько повышенной минерализацией (0,93 г/дм³) и гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевым составом. Грунтовые воды агрессивны к гипсам, ангидритам и доломитам и неагрессивны к известнякам. Дефицит насыщения сульфатом кальция при температуре 5°С составляет 1,51.

Подземные воды нижнепермских отложений представлены водоносной иренской сульфатно-карбонатной серией. Иренские отложения водоносны равномерно по глубине и по площади чему способствует их повышенная трещиноватость. Глубина залегания уровня карстовых вод совпадает с положением кровли карстующихся отложений и составляет 29,0-32,0 м. В пределах изыскиваемой территории трещинно-карстовые воды разгружаются нисходящими и восходящими источниками в рр. Ирень, Карьевка и Турка. По химическому составу трещинно-карстовые воды сульфатно-кальциевые с минерализацией 2,0-2,4 г/дм³. Трещинно-карстовые воды в основном неагрессивны к гипсам, ангидритам известнякам и агрессивны к доломитам. Их дефицит насыщения сульфатом кальция при температуре 5°С составляет 0,06-0,13.

На территории исследуемой площадки в 100-150 м юго-восточнее скважин №№ 32 и 33 располагаются две карстовые воронки, заполненные водой и в которые, по-видимому, отводится часть поверхностного стока с территории предприятия. По химическому составу поверхностные воды из карстового озера, образовавшегося в этих двух воронках гидрокарбонатно-сульфатно-натриевые с минерализацией 0,56 г/дм³. Вода агрессивна к гипсам, ангидритам и доломитам и неагрессивна к известнякам. Дефицит насыщения сульфатом кальция при температуре 5°С составляет 1,58.

Согласно табл. 33 [7], рассматриваемая территория относится ко II типу по потенциальной подтопляемости. В периоды снеготаяния и дождей возможно повышение уровня грунтовых вод в пониженных частях рельефа на 0,2-1,5 м выше замеренных.

Физико-механические свойства грунтов, залегающих на исследуемой площадке, изучались в грунтовой лаборатории согласно приложению М СП [15]. Для этого в полевых условиях осуществлялось опробование грунтов, которое производилось равномерно по площади и по глубине. Всего было отобрано 18 проб грунтов ненарушенного сложения, приуроченных к слою суглинков. Механические характеристики грунтов изучались в процессе их испытаний в компрессионных и сдвиговых приборах.

Карстологические условия в пределах исследуемой площадки строительства нагнетательных скважин и прилегающих к ней участков окружающей территории в целом изучались согласно [12, 16, 22]. На исследуемой территории велось полевое описание и картирование всех имеющихся поверхностных проявлений карста. Изучались условия и закономерности распространения карстопроявлений в пространстве, оценивался их тип, характер образования и интенсивность. Рассматривались возможные влияния техногенных воздействий на активизацию карста.

Исследуемый участок характеризуется средней степенью закарстованности и распространением поверхностных и подземных карстовых форм. На площади 1,5 км² было зафиксировано 27 поверхностных карстопоявлений, 17 из которых представлены отдельными воронками и цепочками воронок (рисунок 4.12). В пределах рассматриваемой территории встречаются карстовые понижения изометрично-округлой формы, в центральной части которых зачастую стоит вода, произрастает характерная древесная, местами болотная растительность. Всего закартировано 10 таких понижений, средние диаметры которых варьируют от 40 до 90 м. Непосредственно в пределах исследуемой площадки карстовых форм не обнаружено.

Распределение закартированных воронок по величине среднего диаметра и глубине приведено на рисунке 4.13. Характерной чертой многих воронок является их относительно большой возраст (более 50 лет), что проявляется в их выположенности в рельефе местности, повышенной увлажненности днищ и произрастании влаголюбивой растительности. Для таких воронок характерны повышенные значения среднего диаметра при сравнительно небольшой глубине.

Подземная закарстованность характеризуется наличием в кавернозных гипсах, ангидритах и известняках полостей как открытых, так и заполненных суглинистым материалом со щебнем и дресвой материнских пород, а также ослабленных раздробленных зон.

В толще известняков архивной скважиной № 1к встречена карстовая полость высотой 1,3 м заполненная дресвой и щебнем известняка, резе ангидрита, глиной известковистой редкой галькой кварцево-кремнистого состава.

Обеими карстологическими скважинами встречены зоны сильно раздробленных коренных пород, приуроченные к слою сильнотрещиноватого гипса, который прослоями разрушен до щебня и дресвы с известково-глинистым заполнителем. Мощность зоны дробления в скважине № 1к составляет 2,0 м, в скважине № 6к – 2,1 м.

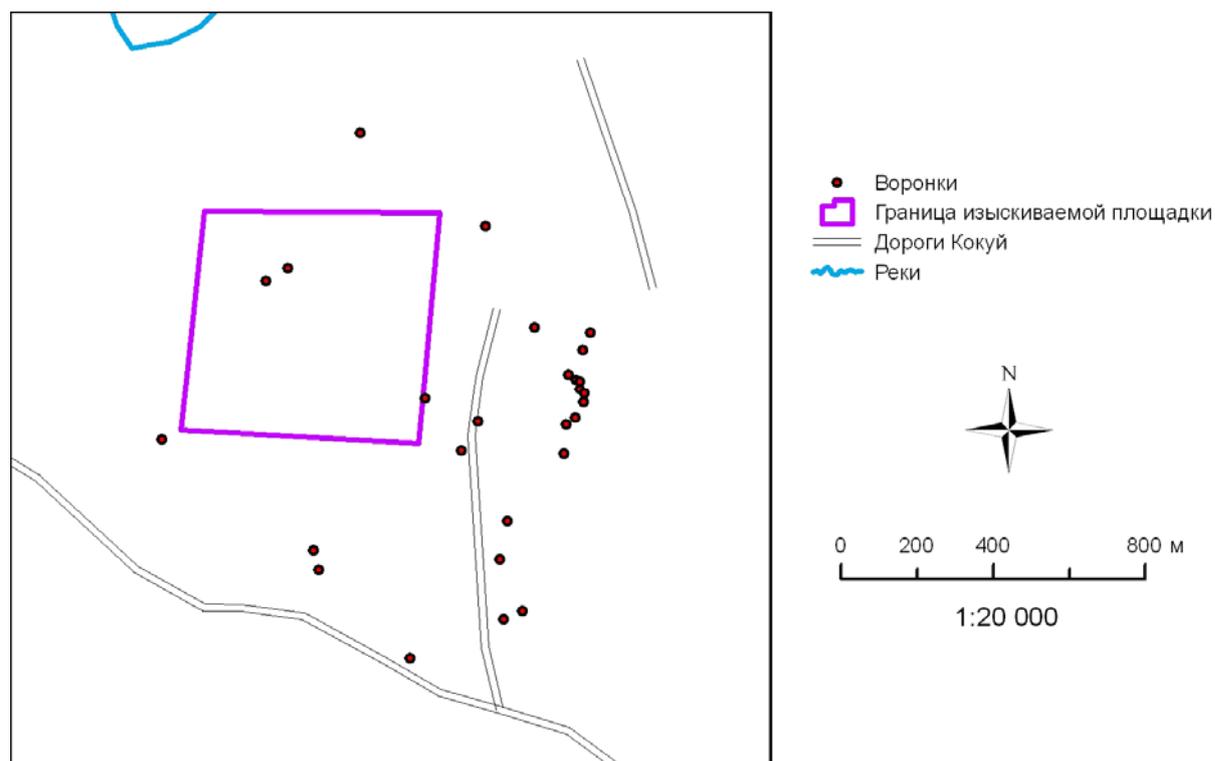


Рисунок 4.12. Схема закартированных поверхностных карстопоявлений

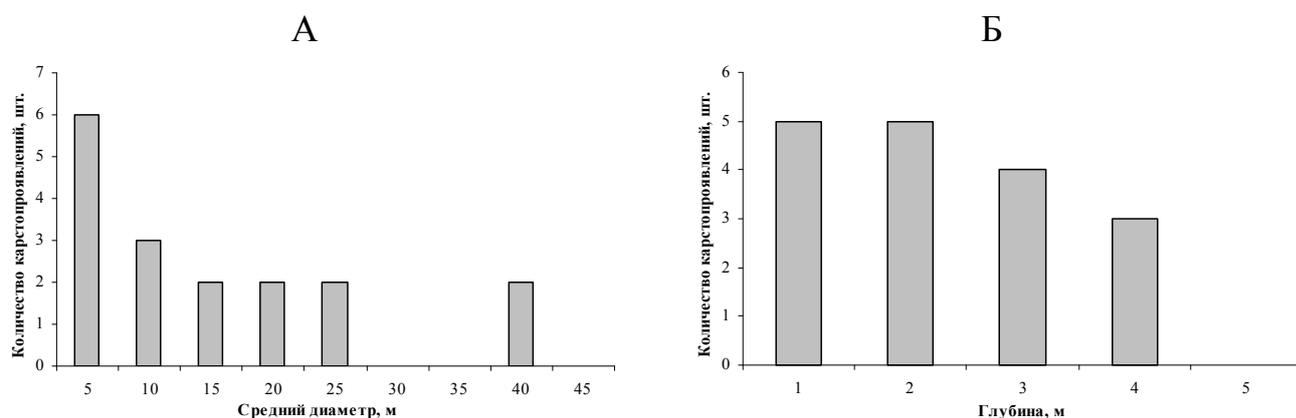


Рисунок 4.13. Распределение карстовых воронок по величине среднего диаметра (А) и глубине (Б)

Нормативная оценка карстоопасности осуществлена по поверхностным карстовым формам (воронкам) в результате расчета интенсивности их образования и оценки средних

диаметров в пределах всей исследуемой территории. Принимая во внимание относительно однородное природное строение рассматриваемого участка в ходе инженерно-карстологического районирования, осуществленного согласно СП [16] (п. 5.2.11), был выделен 1 район площадью 3,5 км², в пределах которого оценены расчетные значения рассматриваемых карстологических показателей.

Ввиду отсутствия данных многолетних наблюдений за процессом провалообразования на исследуемой территории интенсивность провалообразования (СП [16]) оценена с учетом времени их образования принятым равным 100 годам. Данный временной интервал соответствует предельному сроку службы большинства проектируемых зданий и сооружений. При расчете данного показателя во внимание взяты только карстовые воронки.

По результатам оценки карстоопасности нормативным способом территория рассматриваемой площадки 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).

Интегральная оценка карстоопасности осуществлена в границах площадки проектируемых поглощающих скважин. В ее основу положены данные о природном строении изыскиваемой территории, формализованные в виде набора показателей, регламентированных методикой. В качестве опорных точек для установления значений показателей природного строения выступают 6 скважин, приуроченные к разным частям исследуемой площади – это скважины №№ 1, 5, 26, 30, 32, 37 (таблица 4.5).

Показатели структурно-тектонического строения *St* и геоморфологических *Ge* условий оценивались непрерывно по площади в результате построения растровых картографических моделей их изменчивости. Значения с растровых моделей снимались в точках локализации скважин. Показатели геологической *G* и гидрогеологической *Hg* групп, принимая во внимание схожесть природных обстановок развития карста в пределах рассматриваемой территории в целом, оценивались по результатам анализа колонок архивных карстологических скважин. Значения этих показателей, близкие к установленным в карстологических скважинах, присваивались инженерно-геологическим скважинам, пробуренным на территории изыскиваемой площадки. В анализе участвовали все 3 показателя геологической и 3 показателя гидрогеологической групп. Значение минерализации подземных вод определено осреднением частных значений, установленных по пробам, отобранным из грунтовых и трещинно-карстовых водоносных горизонтов.

Значения показателей инженерно-геологической *Eg* группы определялись в пределах каждой из 6 рассматриваемых скважин путем расчета их среднего значения, устанавливаемого

по отобраным из нее пробам грунта. Ввиду ограниченности глубины проходки инженерно-геологических скважин достаточно точные значения механических свойств установлены только для верхнего грунтового слоя, представленного суглинистыми грунтами. Механические характеристики гравийного грунта, залегающего ниже по разрезу, определены приблизительно с использованием методики В.И. Федорова, разработанной в институте ДальНИИС Госстроя СССР [6], исходя из значений характеристик его физических свойств. Прочностные характеристики свойств при ее применении оценивались для условий неконсолидированного среза. Ориентировочные значения физических свойств гравийного грунта установлены по материалам изысканий прошлых лет по 2 пробам, отобраным из скважины № 1к.

Таблица 4.5. Показатели природного строения и их значения в точках локализации скважин*

Номер скважины	<i>St</i>				<i>G</i>			<i>Hg</i>			<i>Ge</i>				<i>Eg</i>		
	<i>L_l</i>	<i>M_l</i>	<i>B_l</i>	<i>R_l</i>	<i>m_p</i>	<i>m_Q</i>	<i>m_{NQ}</i>	<i>H_Q</i>	<i>H_k</i>	<i>M</i>	<i>β</i>	<i>ΔH</i>	<i>U</i>	<i>tan α</i>	<i>E₀</i>	<i>φ</i>	<i>c</i>
с-1	5,6	6,6	0,6	11,1	24,0	21,5	2,5	14,0	29,0	1,40	0,5	18,0	721,7	0,025	23,72	20,23	14,68
с-5	5,7	7,4	0,1	98,8	25,8	23,0	2,8	14,5	30,0	1,65	0,4	17,0	801,0	0,021	23,38	21,75	13,35
с-26	5,6	7,8	0,3	67,4	24,5	22,5	2,0	15,0	29,5	1,55	0,5	18,0	956,8	0,019	21,48	22,73	15,02
с-30	5,8	8,8	0,1	69,8	23,5	21,0	2,5	14,5	31,0	1,70	0,6	16,0	1019,2	0,015	22,67	22,00	12,93
с-32	5,8	9,4	0,2	29,2	25,9	23,5	2,4	14,0	30,5	1,45	0,8	13,0	1095,0	0,012	24,75	23,69	15,52
с-37	5,7	8,6	0,2	105,8	25,1	22,5	2,6	14,5	30,0	1,55	2,4	18,0	930,1	0,018	26,64	23,45	12,77

* Полные наименования групп и показателей природного строения приведены в таблице 3.2

Интегральная оценка карстоопасности, как и в случае с выше рассмотренным линейным объектом, заключалась в расчете четырех параметров опасности – интервальной *Pab*, полной интервальной *Pb* и относительной *p* вероятностей образования карстовых форм, а также их среднего индекса морфометрии *I*. Методика интегрального расчета этих параметров и определение по их значениям нормативных категорий устойчивости подробно описаны выше на примере оценки карстоопасности трассы водовода. Отметим лишь, что в ходе районирования с целью расчета параметра *Pab*, произведенного по принципу, аналогичному предыдущему случаю (*V_g* составил 0,09), был выделен один район, границы которого полностью совпали с контуром проведенной полевой карстологической съемки (3,5 км²).

Результаты расчета интегральных параметров (*Pab*, *Pb*, *p* и *I*), итоговые нормативные категории устойчивости, установленные по их значениям, а также прогнозные морфометрические параметры карстовых форм приведены в таблице 4.6. Как видно из таблицы, интегральные категории устойчивости по интенсивности провалообразования, установленные на исследуемой территории по параметрам *Pab* и *Pb* (IV и III категории соответственно), практически полностью совпадают с результатами нормативной оценки. Численные значения этих параметров приурочены к пограничной зоне между III и IV категориями, что, как уже отмечено выше, характерно и для нормативной расчетной оценки интенсивности провалообразования. Несколько заниженной выглядит оценка по параметру *p* (V категория). Однако и в этом случае значения параметра опасности находятся на стыке IV и V категорий.

Таблица 4.6. Результат интегральной оценки параметров опасности

Номер скважины	Интервальная вероятность		Полная интервальная вероятность		Относительная вероятность		Индекс морфометрии	Средний диаметр, м	Категория устойчивости по величине среднего диаметра	Глубина провала, м	Высота полости, м	Мощность зоны дробления, м
	P_{ab}	$\lambda_{P_{ab}}$	P_b	λ_{P_b}	p	λ_p						
с-1	0,08	IV	0,44	III	0,62	IV	0,14	10,64	Б	3,30	1,91	3,35
с-5			0,41	III	0,58	V	0,15	11,44	Б	3,55	2,06	3,60
с-26			0,40	III	0,58	V	0,15	11,06	Б	3,43	1,99	3,48
с-30			0,40	III	0,58	V	0,15	11,00	Б	3,42	1,98	3,46
с-32			0,41	III	0,59	V	0,15	11,46	Б	3,56	2,06	3,61
с-37			0,39	IV	0,58	V	0,14	11,19	Б	3,48	2,01	3,53
Средняя оценка	0,08	IV	0,41	III	0,59	V	0,15	11,13	Б	3,46	2,00	3,51

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. Наиболее наглядно кондиционность результатов интегральной оценки морфометрических параметров карстовых форм можно проследить на примере сравнения статистических данных по закартированным карстопроявлениям с результатами прогнозирования (таблица 4.7). В этой таблице приведена статистическая характеристика морфометрических параметров закартированных воронок и пройденных архивными скважинами №№ 1к и 6к подземных карстопроявлений (2 зоны дробления и 1 полость) в сопоставлении с результатами прогнозирования, осредненными в пределах исследуемой площади участка.

Как видно из таблицы 4.7, прогнозируемая средняя глубина провалов является в полтора раза большей, по сравнению со средней глубиной закартированных воронок. Данное обстоятельство объясняется возрастом воронок, большинство из которых являются древними и значительно выположенными в рельефе местности. Кроме того, на 20-30% завышены прогнозируемые высота полостей и мощность зон дробления по сравнению со значениями, установленными из анализа разреза архивных скважин. Это объясняется влиянием геоморфологических и структурно-тектонических условий, которые при общей схожести (приуроченность к одному геоморфологическому элементу) в пределах исследуемой площадки и участка локализации карстологических скважин все же являются несколько отличными, что проявляется в повышенных значениях показателей группы геоморфологического строения на территории изыскиваемого объекта.

Таблица 4.7. Сравнение морфометрических параметров закартированных и прогнозируемых карстовых форм

Морфометрические параметры карстовых форм	Значения морфометрических параметров	
	закартированных карстовых форм	прогнозируемых карстовых форм
<i>Поверхностные карстовые формы</i>		
Средний диаметр, м		
- минимальный	1,5	
- максимальный	39,0	
- средний	13,1	11,2
Глубина, м		
- минимальная	0,5	
- максимальная	4,0	
- средняя	2,2	3,5
Глубинность, д.е.		
- минимальная	0,07	
- максимальная	0,67	
- средняя	0,28	0,31
Площадь, м ²		
- минимальная	1,6	
- максимальная	1099,0	
- средняя	218,5	97,3 *
Объем, м ³		
- минимальный	0,4	
- максимальный	1612,0	
- средний	259,3	134,5 *
<i>Подземные карстовые формы</i>		
Высота полостей, м		
- средняя	1,3	2,0
Мощность зон дробления, м		
- средняя	2,1	3,5

* Значения средней площади и среднего объема прогнозируемых провалов примерно оценены исходя из предположения о круглой форме в плане и конусообразной в разрезе

Таким образом, результаты интегральных построений по оценке карстоопасности при исследованиях в границах некоторой ограниченной площади в полной мере совпадают с результатами нормативной оценки. Степень совпадения в данном конкретном случае достигает 80-100%. При этом следует подчеркнуть, что ряд показателей природного строения (геологические, гидрогеологические и отчасти инженерно-геологические) в пределах исследуемой площади установлен косвенным образом путем анализа колонок карстологических скважин, расположенных в 2 км юго-восточнее. Это обстоятельство позволяет рекомендовать интегральный подход взамен нормативного для решения задач по оценке карстоопасности в условиях недостатка информации о закарстованности и природных условиях конкретной изучаемой площади. Интегральная оценка в таких случаях может быть проведена по архивным данным, имеющимся для смежных участков, а при определенных условиях и по объектам аналогам, расположенным в схожих природных обстановках развития карста.

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, позволяют заключить о

целесообразности его использования при решении подобного рода задач. Положительными моментами интегральной оценки являются:

1) 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.

2) входные данные – набор легко устанавливаемых в повседневной изыскательской практике количественных показателей природного строения, в максимальной степени объективно отражающих условия протекания карстового процесса;

3) относительная простота осуществления расчета – алгоритм расчета интегральной модели сводится к последовательному выполнению простых математических операций;

4) 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;

5) возможность оценки карстоопасности как в площадном отношении (параметры Pab , I), так и в конкретной точке массива (параметры Pb , p , I);

6) 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 [16]);

7) 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;

8) возможность проведения оценки в труднодоступных для непосредственного изучения в полевых условиях районах или в пределах участков с крайне незначительным развитием поверхностных карстопроявлений, где объективное заключение об интенсивности и масштабах провалообразования с применением нормативной методики оценки крайне затруднительно;

9) 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 показателям 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. Например, прогнозные значения средних диаметров провалов в пределах рассмотренной выше площадки проектирования поглощающих скважин на территории Кокуйского нефтяного месторождения, по нашему мнению, являются завышенными в 1,4-1,6 раза, несмотря на их фактическое совпадение с диаметрами закартированных в пределах этой площади воронок. Аналогичное замечание касается прогнозируемых морфометрических характеристик подземных карстовых форм и зон дробления. Объяснение этому феномену может быть найдено во входных данных, в ходе анализа которых выводились прогнозные уравнения для оценки средних морфометрических параметров карстовых форм в зависимости от значений показателей природного строения. Напомним, при поиске корреляционных взаимосвязей и выводе уравнений регрессии в качестве единой совокупности рассматривались морфометрические характеристики как молодых, так и древних воронок, одновременно изучались как открытые, так и заполненные карстовые полости. Причины проведения анализа именно в таком ключе уже рассмотрены нами ранее. 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 выше отмеченных 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.

Резюмируя выше сказанное, еще раз отметим, что предложенная интегральная модель оценки карстоопасности не является идеальным решением и, безусловно, требует дальнейшего совершенствования и доработки в рамках выше обозначенных направлений. Но, несмотря на это, оценочные построения карстоопасности, получаемые с применением рассмотренной интегральной модели с учетом заложенных в нее в настоящее время математических зависимостей позволяют в полной мере решать большинство практических задач, связанных с инженерно-геологической оценкой карстоопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 результате проведенных исследований сформулирована методология оценки карстоопасности, на базе которой разработан и предложен конкретный методический подход для осуществления оценки.

В процессе выполнения работы был изучен и обобщен передовой мировой опыт оценки карстоопасности. Известные в настоящее время методические подходы и способы оценки карстоопасности целенаправленно поделены на три направления, связанные с изучением: 1) поверхностных и подземных карстовых форм (закарстованности), 2) отдельных факторов природных условий территорий развития карста и 3) совокупного влияния различных факторов, обуславливающих активность карстового процесса (интегральный подход). Такое разделение позволило более глубоко и осмысленно подойти к анализу имеющихся на сегодняшний день методик, в максимальной степени раскрыть их суть и области применения. Изучение проблематики оценки карстоопасности в ключе трех выделенных направлений позволило не только рассмотреть, но и обосновать имеющие недостатки применяемых подходов, на базе которых были сформулированы четыре основных методологических принципа оценки карстоопасности на современном этапе развития инженерного карстоведения:

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: структурно-тектоническую, геологическую, гидрогеологическую, геоморфологическую и инженерно-геологическую. При формировании набора показателей были выдвинуты 8 основных условий, которым в полной мере удовлетворяют предложенные показатели. Большинство из показателей, входящих в набор, являются широко распространенными в практике карстологических исследований (показатели геологической, гидрогеологической и инженерно-геологической групп).

Реализация третьего принципа осуществлена в результате комплексного исследования природных условий и закарстованности массивов пород, локализованных в пределах четырех ключевых участков Пермского края. На основе их изучения получены типовые закономерности распространения поверхностных и подземных карстовых форм и изменчивости их морфометрических параметров в зависимости от значений показателей природного строения. Предложена методика совместной обработки установленных закономерностей, позволяющая по результатам их анализа оценивать интегральные вероятности образования карстовых форм, а также прогнозировать их средние морфометрические параметры.

Соответствие разработанной методики интегральной оценки карстоопасности четвертому выдвинутому принципу доказано в результате ее апробации в пределах двух закарстованных участков Пермского края, локализованных в различных структурно-тектонических и геолого-гидрогеологических условиях, в рамках которых в 2011 г. 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.

Теоретическая значимость исследований обоснована широким применением вероятностно-статистического математического аппарата, а именно известных общенаучных статистических процедур и методик, в результате чего были выявлены и доказаны взаимосвязи между геолого-гидрогеологическими условиями развития карстовых массивов и их закарстованностью, а также установлена генеральная зависимость между морфометрическими параметрами поверхностных и подземных форм карста.

На основе массового статистического анализа морфометрических параметров различных карстовых форм установлен ряд закономерностей, позволяющих осуществлять взаимный прогноз морфометрических характеристик одних карстовых форм по значениям других, исходя из знания их статистических распределений. Для этого 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.

Влияние рассматриваемых показателей природного строения на интенсивность развития карста изучено посредством их сопоставления с исследуемыми карстовыми формами и их морфометрическими 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.

В процессе анализа карстовых форм и показателей природного строения, рассматриваемых в рамках выделенных групп, установлен ряд закономерностей:

- 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 обвально-карстовой толщи. Степень соответствия теоретических распределений эмпирическим аналогам оценена как 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 карстопроявлений 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.

Определение вероятностных величин карстоопасности производится на базе установленных теоретических распределений карстовых форм по исследуемым показателям природного строения в результате расчета интегральной и дифференциальной функций распределения и их дальнейшего анализа. Оценка морфометрических параметров вновь образующихся карстовых форм осуществляется с применением установленных прогнозных регрессионных уравнений. Интегральный учет этих характеристик производится на базе частных оценок, полученных для отдельных показателей природного строения и сгруппированных в соответствующие группы в зависимости от генетической принадлежности показателей.

Практическая значимость исследований продиктована тем, что разработан новый методический подход к оценке карстоопасности в пределах территорий развития карбонатно-сульфатного карста Пермского края, сформулирован алгоритм произведения оценки.

Основными положительными моментами и преимуществами разработанного подхода по отношению к ранее предлагавшимся аналогам являются:

- 1) 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.

2) входные данные – набор легко устанавливаемых в повседневной изыскательской практике количественных показателей природного строения, в максимальной степени объективно отражающих условия протекания карстового процесса;

3) относительная простота осуществления расчета – алгоритм расчета интегральной модели сводится к последовательному выполнению простых математических операций;

4) вариативность оценочных параметров опасности – для оценки активности протекания карстового процесса предложено три количественных вероятностных параметра, которые могут быть применены как по отдельности, так и в совокупности; некоторые из этих параметров могут быть задействованы в расчетных моделях при оценке карстовых рисков;

5) возможность оценки карстоопасности как в площадном отношении, так и в конкретной точке массива;

6) 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 к категориям устойчивости по интенсивности провалообразования, рассчитанной за 100-летний период;

7) 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;

8) возможность проведения оценки в труднодоступных для непосредственного изучения в полевых условиях районах или в пределах участков с крайне незначительным развитием поверхностных карстопроявлений, где объективное заключение об интенсивности и масштабах провалообразования с применением нормативной методики оценки крайне затруднительно;

9) 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.

В дополнение к приведенным пунктам отметим, что результаты интегральных построений по оценке карстоопасности, проведенные в рамках тестовых площадок Пермского края, в полной мере совпадают с результатами нормативной оценки. Степень совпадения достигает 80-100%. Однако оперативность, детальность и объективность решения подобного рода задач с применением разработанного интегрального подхода на порядок выше.

Подводя итог, подчеркнем, что предложенная интегральная модель оценки карстоопасности не является идеальным решением и, безусловно, требует дальнейшего совершенствования и доработки. Но, несмотря на это, оценочные построения карстоопасности, получаемые с применением рассмотренной интегральной модели с учетом заложенных в нее в настоящее время математических зависимостей позволяют в полной мере решать большинство практических задач, связанных с инженерно-геологической оценкой карстоопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

А. Нормативная

1. *ГОСТ 25100-95*. Грунты. Классификация.
2. *Инструкция* по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М., 1984. 10 с.
3. Методические рекомендации по изучению инженерно-геологических явлений, связанных с карстом / *Б.М. Гамалей, Г.Г. Скворцов*. Москва, ВСЕГИНГЕО, 1971. 65 с.
4. Методические рекомендации по изучению карста при поисках и разведке месторождений карбонатных пород / *Ф.С. Хабибуллина, П.В. Вишневский*. Казань, 1987. 97 с.
5. Методические рекомендации по прогнозу карстопровальной опасности с учетом временного фактора / *Н.А. Блоцкий, Н.Н. Ковшиков*. Черкассы: ОНИИТЭХИМ, 1989. 35 с.
6. *Методика оценки прочности и сжимаемости* крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями / *ДальНИИС*, М.: Стройиздат 1989. 24 с.
7. *Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений* (к СНиП 2.02.01-83*). М.: Стройиздат, 1986. 391 с.
8. *Рекомендации* по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР. М.: ПНИИИС, 1967.
9. *Рекомендации* по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах СССР. М.: ПНИИИС, 1967. 73 с.
10. *Рекомендации* по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области. Нижний Новгород, 2012. 140 с.
11. *РСН 1-91*. Инженерные изыскания для строительства. Нормы производства инженерных изысканий на закарстованных территориях. Уфа: Госстрой БССР, 1991. 38 с.
12. *Руководство* по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС, 1995. 167 с.
13. *СНиП 1.02.07-87*. Инженерные изыскания для строительства. М.: ПНИИИС, 1987. 104 с.
14. *СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М., 2003.
15. *СП 11-105-97*. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ / Госстрой России. М.: ПНИИИС. 1997. 47 с.

16. *СП 11-105-97*. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: ПНИИИС. 2001. 101 с.
17. *СП 50-101-2004*. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: Госстрой России, 2005.
18. *СП 22.13330.2011*. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 166 с.
19. *СП 14.13330.2011*. Строительство в сейсмических районах. М.: ЦНИИСК. 2011.
20. *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.
21. *ТСН 22-308-98 НН*. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород: Администрация. 1999. 72 с.
22. *ТСН 11-301-2004 По*. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях Пермской области. Пермь: Администрация. 2004. 122 с.
23. *ТСН 31-11-2005 Пк*. Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Пермского края. Пермь: Администрация. 2005. 46 с.
24. *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.

Б. Опубликованная

25. *Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П., Смирнов А.И., Травкин, А.И.* Карст Башкортостана. Монография. Уфа: «Информреклама», 2002. 385 с.
26. *Адерхолд Г.* Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий. Под ред. Е.В. Копосова, пер с нем. В.В. Толмачева. Н.Новгород: ННГАСУ, 2010. 109 с.
27. *Андрейчук В.Н.* Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Прут, 1999. 52 с.
28. *Бесстрашнов В.М., Кожурин А.И., Стром А.Л.* Использование данных лазерного сканирования при изысканиях // Матер. 3-й общерос. конф. изыск. орг.: Перспективы развития

инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации (20-21 декабря, 2007). Москва, 2008. С. 43-46.

29. *Блоцкий Н.А., Тихомиров В.Г.* Изучение, прогноз и защита окружающей среды при кастообразовании в зонах разработки серных месторождений. Обзор. информ. М.: НИИТЭХИМ, 1985. 26 с.

30. *Болотов Г.Б., Гайнанов Ш.Х.* Влияние карстово-суффозионных процессов на инженерно-геологические условия п. Полазна // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: тезисы докл. семинара (29-30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979. С. 76-77.

31. *Будков В.П., Литвинов А.А., Клинец А.В., Цикина В.С.* Влияние закарстованности на устойчивость откосов // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: тезисы докл. семинара (29-30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979. С. 71-74.

32. *Бураков А.Д.* Водообильность зон тектонических нарушений Демидско-Уфимской депрессии // Карст Урала и Приуралья: матер. Всеуральского совещания, ноябрь, 1968 г. Пермь, 1968. С. 54-57.

33. *Бусыгин Б.С., Никулин С.Л.* Генерализация космических снимков для повышения эффективности решения геологических задач методами линеаментного анализа // Известия вузов. Горный журнал. № 4, 2009. С. 82-88.

34. *Васильев И.Н., Задорожная Л.П.* Основные закономерности влияния геолого-тектонических условий на закарстованность и характер водного стока в Приднестровье // Закономерности распределения подземных вод, карст и сели Карпатской зоны: матер. Республиканского научно-технического совещания. «Наукова думка», Киев, 1972. С. 55-57.

35. *Верзаков М.С.* Опыт использования методов математической статистики для оценки вероятностных размеров карстовых провалов // Вопросы карстоведения. Пермь, 1969. С. 12-16.

36. *Гвоздецкий Н.А.* Применение количественных методов для определения скорости карстовой денудации // Вестник МГУ. Серия «География». № 4, 1970. С. 43-48.

37. *Гвоздецкий Н.А., Ступишин А.В., Трофимов А.М., Торсуев Н.П.* Обзор количественных методов, применяющихся при изучении карстовых форм (критический обзор) // Физическая география и геоморфология Среднего Поволжья. Изд-во Казанск. Ун-та, 1972. С. 3-26.

38. Геология и карст города Кунгура: монография / *Катаев В.Н., Кадебская О.И.* Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН. Пермь, 2010. 236 с.

39. *Горбунова К.А.* Формирование карстовых брекчий восточного крыла Уфимского вала в свете гидрогеологических данных // Геология и разведка. Изв. ВУЗ, № 10, 1960.

40. *Горбунова К.А.* Морфометрическая характеристика карбонатного карста // Карст Урала и Приуралья: матер. Всеуральского совещания, ноябрь, 1968 г. Пермь, 1968. С. 33-39.

41. *Горбунова К.А.* Морфология и гидрогеология гипсового карста. Пермь, 1979.

42. *Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г.* Карст и пещеры Пермской области. Пермь. 1992. 200 с.
43. *Гулакян К.А.* Прогноз развития оползневого процесса. Автореф. дис. д-ра геол.-минер. наук. М., 1987. 51 с.
44. *Гулакян К.А., Кюнцель В.В., Постоев Г.П.* Прогнозирование оползневых процессов. М.: Недра, 1977. 137 с.
45. *Гусева А.Н.* К геоморфологической характеристике юго-восточной части Пермской области. География Пермской области, вып. 3. Пермь, 1966.
46. *Дорофеев Е.П.* Взаимосвязь подземных и поверхностных карстовых форм на примере Кунгурской пещеры // Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна в карстовых районах. М., 1968. С. 147-151.
47. *Дорофеев Е.П.* Соотношение размеров провальных впадин и карстовых полостей в сульфатных породах // Вопросы карстоведения. Вып. 2. Пермь, 1970. С. 11-15.
48. *Дорофеев Е.П., Шигабутдинова Г.А.* Изучение карстовых форм рельефа в районе г. Кунгура с инженерно-геологическими целями // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 45-46.
49. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск: Изд-во РАН, 1992. 143 с.
50. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Теоретические основы изучения парагенезиса карст-подтопление. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1998. 204 с.
51. *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, вып. 10. Москва: Изд-во ГЕОС, 2008. С. 129-134.
52. *Дублянский В.Н., Клименко В.И., Михайлов А.Н.* Ведущие факторы развития карста и балльная оценка его интенсивности // Инженерная геология. № 2, 1990. С. 52-58.
53. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Карстоведение. Ч.1. Общее карстоведение: Учеб. пособие / Перм. ун-т. Пермь, 2004. 308 с.
54. *Ерофеев Е.А.* К определению «карстоопасность» // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь. 2003. С. 243-247.
55. *Ерофеев Е.А.* Применение вероятностно-статистических методов для оценки карстовой опасности // Гидрогеология и карстоведение: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2010. – Вып. 17. С. 47-61.

56. *Ерофеев Е.А., Катаев В.Н.* Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории // Инженерная геология, № 4, 2010. С. 34-46.

57. *Зиангиров Р.С., Миронов Н.А., Пендин В.В.* Применение многомерного корреляционно-регрессионного анализа для оценки и прогноза устойчивости закарстованной территории // Инженерная геология. № 3, 1986. С. 55-64.

58. *Золотарев Д.Р.* Результаты линеаментного анализа на закарстованных территориях Пермского края // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. [Адрес в сети Интернет: www.science-education.ru/105-7233] (дата обращения: 23.10.2012).

59. *Золотарев Д.Р.* Влияние линеаментов на распределение карстовых форм и их морфометрию // Региональные исследования природно-территориальных комплексов / Сироткин В.В., Денмухаметов Р.Р. – Казань: ИД МеДДок, 2012. С. 63-69.

60. *Золотарев Д.Р., Катаев В.Н.* Анализ соотношения структурно-тектонического строения и закарстованности в пределах Полазненской локальной структуры // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2012. Т. 154, кн. 3. С. 196-204.

61. *Золотарев Д.Р., Катаев В.Н.* Роль линеаментов в развитии карстового процесса и их связь с физико-механическими свойствами грунтов // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 182-185.

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

63. *Иванов Б.Н.* Типовые связи поверхностных и глубинных карстопроявлений в горном Крыму // Труды комплексной карстовой экспедиции Академии наук УССР. Изд-во Академии наук Украинской ССР, Киев, 1963. С. 17-26.

64. *Иванов Б.Н., Зенгина С.М.* Применение морфометрического анализа к изучению современных физико-географических процессов (на примере Горного Крыма) // Вопросы морфометрии. Вып. 2. Саратов, 1967. С. 10-16.

65. *Иванов Б.Н., Дублянский В.Н., Шутов Ю.И.* Основные результаты и очередные задачи изучения карста западных областей УССР // Закономерности распределения подземных вод, карст и сели Карпатской зоны: матер. Республиканского научно-технического совещания. «Наукова думка», Киев, 1972. С. 62-64.

66. *Ильин А.Н.* К вопросу изучения региональных закономерностей распространения и развития карста // Вопросы инженерного карстования. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 10-12.

67. Инженерное карстоведение. Карстоведение. Часть 3: учебное пособие / В.Н. Дублянский, Г.Н. Дублянская, В.Н. Катаев, В.П. Костарев, В.В. Толмачев. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2011. 288 с.
68. Катаев В.Н. Методология и практика сравнительно-оценочного карстологического районирования. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2001. 85 с.
69. Катаев В.Н. Основы структурного карстоведения: Учеб. пособие по спецкурсу / Перм. ун-т. Пермь, 2004. 143 с.
70. 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. Матер. Межд. конф. – Пермь, Гент, 2009. С. 458-462.
71. 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) // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 66-76.
72. Катаев В.Н., Лихая О.М., Ковалева, Т.Г., Золотарев Д.Р., Щербаков С.В. Взаимосвязь особенностей развития иренского водоносного горизонта с проявлениями карста на территории г. Кунгур // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 293-296.
73. Катаев В.Н., Лихая О.М., Ковалева Т.Г., Золотарев Д.Р., Щербаков С.В. Содержание работ, направленных на создание основ карстомониторинга // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 287-290.
74. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Ковалева Т.Г. Проблема освоения закарстованных территорий // Геология крупных городов: матер. межд. конф., Санкт-Петербург, 25-25 ноября, 2009. С. 53-54.
75. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М. Применение методов трехмерного моделирования при оценке карстовой опасности территории // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 290-293.
76. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М. Компьютерное картографирование и моделирование в целях прогнозной оценки карстоопасности // Сергеевские чтения, вып. 11. Москва: Изд-во ГЕОС, 2009. С. 109-114.
77. 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) // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 77-93.

78. *Ковалева Т.Г., Золотарев Д.Р., Щербаков С.В.* К характеристике подземной закарстованности территории г. Кунгур // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Изд-во Перм. ун-та, 2007. С. 210-212.
79. *Копосов С.Е.* Геоэкологическая оценка техногенного загрязнения подземных вод в карстовых районах и обоснование защитных мероприятий. Автореф. дис. канд. техн. наук. Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. Н. Новгород, 2005. 22 с.
80. *Космическая информация в геологии.* Коллектив авторов, монография. М. Наука, 1985. 540 с.
81. *Костарев В.П., Иконников Е.А.* Количественная оценка карста при инженерно-геологических исследованиях // Вопросы инженерного карстования. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 51-55.
82. *Костарев В.П.* О количественных показателях карста и их использовании при инженерно-геологической оценке закарстованных территорий // Инж.-строит. изыскания. М. 1979. № 1 (53). С. 49-53.
83. *Костарев В.П.* Провалы Кунгурско-Иренского междуречья // Карстовые провалы: Тез. докл. Юбил. Конф. Кунгур, 28-29 сент., 1994 г. Екатеринбург: «УИФ «Наука», 1994. С. 60-63.
84. *Кошкина Д.В., Лихая О.М., Золотарев Д.Р., Щербаков С.В.* Обоснование природных подсистем карстомониторинга (на примере г. Кунгур) // Проблемы инженерной геологии карста урбанизированных территорий и водоранилищ. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2008. С. 203-208.
85. *Круковский Г.Л.* Вероятностное прогнозирование склоновых процессов (на примере оползней верховьев р. Чирчика) // В кн.: Динамика горных склонов Чаткало-Кураминской зоны. Ташкент, ФАН, 1977. с. 136-157.
86. *Кутепов В.М.* Оценка устойчивости закарстованных территорий методом анализа напряженного состояния массивов пород. Обзор и рекомендации. М.: ЦП НТГО, 1986. 69 с.
87. *Кутепов В.М., Кожевникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
88. *Кутепов В.М., Хоменко В.П. и др.* Глава 4.4. «Карст и суффозия» в книге «Москва. Город и геология» (ред. В.И. Осипов и О.П. Медведев). Москва: Изд-во «Московские учебники и Картолитография», 1997. С. 197-196.
89. *Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Соколов В.С., Райков А.А.* Карстово-суффозионная опасность на участке строительства третьего кольца автодороги в северо-западном районе г. Москвы // Сергеевские чтения. Вып. 3. М.: ГЕОС, 2001. С. 231-234.
90. *Кухарев Н.М.* Инженерно-геологические изыскания в областях развития карста в целях строительства. М.: Стройиздат, 1975. 168 с.

91. *Лаврова Н.В.* Закономерности распространения и формирования карстовых брекчий (на примере Пермского Прикамья) // Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Пермь. 2005.
92. *Лахи Ф.* Полевая геология. М.: Мир, 1966. Т. 1. 482 с.
93. *Лежнев В.С.* Некоторые критерии оценки устойчивости территорий в карстовых районах при инженерно-геологических изысканиях // Вопросы инженерного карстования. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 56-58.
94. *Логинов Н.Х.* Об устойчивости участков в районах сульфатного карста Предуралья // Вопросы инженерного карстования. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 13-16.
95. *Лукин В.С.* Соотношение поверхностной и внутренней закарстованности пород как показатель интенсивности провального процесса // Инженерные изыскания для строительства. Серия 5, № 12., 1968. С. 12-20.
96. *Лукин В.С.* Инженерно-геологические условия в областях сульфатного карста Предуралья // Вопросы инженерного карстования. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 20-23.
97. *Лукин В.С., Ежов Ю.А.* Карст и строительство в районе г. Кунгура. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1975. 118 с.
98. *Лыкошин А.Г.* Карст и гидротехническое строительство. М.: Изд-во литерат. по строит., 1968. 180 с.
99. *Макеев З.А.* Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей // Тезисы докладов Пермской карстовой конференции. Пермь, 1947. С. 26.
100. *Максимович Г.А.* Плотность карстовых воронок и устойчивость закарстованных территорий // Геология и разведка. № 7, 1961. С. 118-125.
101. *Максимович Г.А.* Основы карстования. Т. 1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь, 1963. 447 с.
102. *Максимович Г.А.* Скорость развития карста // Карст Урала и Приуралья: матер. Всеуральского совещания, ноябрь, 1968 г. Пермь, 1968. С. 29-33.
103. *Максимович Г.А.* Основные обстановки развития карста в Предуралье и на западном Урале // Вопросы инженерного карстования. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 4-9.
104. *Максимович Г.А., Горбунова К.А.* Карст Пермской области. Пермь, 1958. 153 с.
105. *Максимович Г.А., Вохмянина Е.И.* Геоморфологическая карта Пермской области // Информ. листок. Пермь. № 179, 1979.

106. *Максимович Н.Г.* Роль покровных отложений при инженерно-геологической оценке гипсового карста северной части Кунгурского района // Региональная геология некоторых районов СССР. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 4. С. 148-154.

107. *Мартин В.И.* О методике дешифрирования карстопроявлений по аэрофотоматериалам // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 37-38.

108. *Мартин В.И.* Карстовый процесс и некоторые задачи его изучения // Состояние, задачи и методы изучения глубинного карста СССР. Тезисы докладов III Всесоюзного карстово-спелеологического совещания 1-3 октября 1982 г. Москва, 1982. С. 12-13.

109. *Мартин В.И., Травкин А.И.* Вопросы прикладной инженерной геологии карста (на примере Башкирии) // Инженерная геология карста: Доклады международного симпозиума. 6-8 июля 1992. (Пермь), Россия. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1993. – Том 1. С. 237-244.

110. *Марцинкявичус В.И., Микишис Б.А.* Расчетный прогноз критического радиуса карстовых провалов в условиях многослойной перекрывающей толщи // Карстование – XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы международного симпозиума (25-30 мая, 2004, Пермь, Россия) / Пермский ун-т. Пермь, 2004. С. 222-228.

111. *Мионов Н.А.* Методика оценки и прогноз устойчивости закарстованных территорий (на примере некоторых районов развития карбонатного и сульфатного карста). Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. М.: ПНИИИС, 1984. 26 с.

112. *Наливкин В.Д.* Стратиграфия и тектоника Уфимского плато и Юрюзано-Сылвенской депрессии. Л.М: Гостоптехиздат, 1949. 204 с.

113. Опасные экзогенные процессы / *В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев* и др. / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.

114. *Осипов В.И., Кутепов В.М., Макаров В.И.* Геологические условия градостроительного развития Москвы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. №2, 2006. С. 99-114.

115. *Пендин В.В.* Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии: учебное пособие. М.: КДУ, 2009. 350 с.

116. *Печеркина Л.В.* Гидрогеология и гидрохимия Полазненского гипсо-ангидритового массива. Пермь, 1983. 124 с.

117. *Печеркин И.А.* К вопросу типизации закарстованных берегов Камского водохранилища // Вопросы карстоведения. Матер. совещания по полезным ископаемым карстовых полостей и впадин и другим вопросам карстоведения. Пермь, 1969. С. 82-86.

118. *Печеркин И.А.* Оценка инженерно-геологической устойчивости закарстованных территорий // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 17-19.
119. *Печеркин А.И.* Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 172 с.
120. *Печеркин А.И., Болотов Г.Б.* Геодинамика рельефа карстующихся массивов. Учебное пособие по спецкурсу. – Пермь: Пермский университет, 1983. – 84 с.
121. *Печеркин А.И., Закоптелов В.Е.* Основные условия и механизм образования суффозионных консеквентных оползней // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: тезисы докл. семинара (29-30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979. С. 67-69.
122. *Печеркин А.И., Печеркина Л.В.* Инженерно-геологическое значение структурно-тектонического строения и геоморфологических условий развития карста // Инженерная геология карста: Доклады международного симпозиума. 6-8 июля 1992 (Пермь), Россия. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1993. – Том 1. С. 38-46.
123. *Попов И.В.* Инженерная геология. М.: Госгеолиэдат, 1951. 444 с.
124. *Рагозин А.Л., Елкин В.А.* Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33-52.
125. *Ремизов В.Г.* Принципы крупномасштабного инженерно-геологического районирования закарстованных территорий некоторых промышленных городов Горьковской области // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 41-42.
126. *Родионов Н.В.* Некоторые данные о скорости развития карста в карбонатных породах // Труды лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского. Т. 6, 1950. С. 33-36.
127. *Саваренский Ф.П.* Гидрогеология. М., 1933.
128. *Саваренский Ф.П.* Инженерная геология. М., ОНТИ НКТП СССР, 1937. 443 с.
129. *Саваренский И.А.* Вероятность появления карстовых провалов различных диаметров в районе города Дзержинска // Новости карстоведения и спелеологии. № 3. М., 1963. С. 35-39.
130. *Саваренский И.А.* Детальный анализ неравномерности распространения и развития карста на примере г. Дзержинска Горьковской области // В реф. Сб.: Инженерные изыскания в строительстве, сер. XV, 1977, вып. 6 (59).
131. *Саваренский И.А.* Прогнозирование устойчивости закарстованных территорий // Свойства грунтов и инженерно-геологические процессы. Москва, Наука, 1987, с. 45-53.
132. *Саваренский И.А.* Прогноз устойчивости территории методом удаленности от ближайшего проявления карста // Прогноз изменения инженерно-геологических условий при строительстве. Москва, 1990, с. 108-118.

133. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М., ПНИИС, 1995. 168 с.
134. *Сафронова А.А.* Инженерно-геологическое районирование территории г. Первомайска Горьковской области // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 39-40.
135. *Смирнов С.И.* Вероятностно-статистические закономерности распределения химических элементов в природных водах. Сб. «Гидрогеохимические материалы». М., изд. АН СССР, 1963. С. 5-55.
136. *Смирнов А.И.* Карстоопасность Южного Урала и Предуралья (принципы и опыт оценки) // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 230-232.
137. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. М., Госгеолтехиздат, 1962. 320 с.
138. *Соколова И.А.* Оценка карстовой опасности в заречной части Нижнего Новгорода с применением ГИС-технологий. Автореф. на соиск. уч. ст. канд. геол.-минерал. наук. Нижний Новгород: ООО «М-Принт», 2010. 26 с.
139. *Софроницкий П.А.* Тектоническое районирование Пермской области. Доклады IV Всеуральского совещания по физико-географическому и экономико-географическому районированию Урала. Вып. 1. Пермь, 1958.
140. *Справочник гидрогеолога.* Под ред. М.Е. Альтовского. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 616 с.
141. *Стратиграфический кодекс России.* Издание третье. СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2006. 96 с.
142. *Ступишин А.В., Трофимов А.М., Торсуев Н.П., Бастраков Г.В.* К разработке вопроса количественного анализа связей основных морфометрических показателей карстовых воронок (провалов) // Матер. V съезда ГО СССР. Фиксированные выст. Доп. выпуск. Л., 1970. С. 74-77.
143. *Сунгатуллин Р.Х.* Интегральная геология. Казань: ООО «Образцовая типография», 2006. 142 с.
144. *Сычева М.Д.* Оценка устойчивости площадок при инженерно-геологических изысканиях в зависимости от наличия карстовых полостей // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 47-50.
145. *Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З.* Терминология карста. М.: Наука, 1991. 259 с.

146. *Толмачев В.В.* Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980, № 3. С. 98-107.

147. *Толмачев В.В.* Анализ исследований в области вероятностных методов прогноза карстоопасности // Гидротехническое строительство. №12. 2003. С. 39-42.

148. *Толмачев В.В., Антонов Ю.П., Беляев В.Л.* К вопросу о вероятностной оценке степени опасности карста для целей строительства // Вопросы инженерного карстоведения: тез. докл. к инженерно-геологическому совещ. в г. Кунгур. – Кунгур, 1972. С. 30-32.

149. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.

150. *Толмачев В.В., Хоменко В.П., Нецеткин О.Б., Беляев В.Л.* Комплексный подход к оценке карстоопасности для промышленного и гражданского строительства // Строительство на закарстованных территориях. – М., 1983., С.57-59.

151. *Толмачев В.В., Ройтер Ф.* Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990. 151 с.

152. *Толмачев В.В., Леоненко М.В.* Анализ нормативных документов по изысканиям и проектированию сооружений в карстовых районах России // Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий. Материалы Международного симпозиума. Екатеринбург: Изд-во «АКВА-ПРЕСС», 2001 г. 2 тома. 792 стр. С. 200-206.

153. *Толмачев В.В., Леоненко М.В.* О классификации закарстованных территорий по провальной опасности // ОФМГ, № 2, 2005. С. 11-14.

154. *Торсуев Н.П., Трофимов А.М.* Зависимость диаметра карстовых воронок от глубины и ее геоморфологический смысл // Географический сборник. Вып. 4. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1969. С. 12-18.

155. *Торсуев Н.П.* Пространственно-временная организация карстовых систем. Казань: Изд-во «Отечество», 2007. 180 с.

156. *Травкин А.И.* Прогноз карстоопасности и районирование закарстованных территорий // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва, 1989.

157. *Туркина Л.Г.* Инженерно-геологические особенности развития сульфатного карста на территории г. Риги // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: тезисы докл. семинара (29-30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979. С. 77-80.

158. *Усольцев Л.Н.* Генетические типы карстовых провалов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1971. № 8. С. 37-40.

159. *Хоменко В.П.* Лабораторная модель суффозионно-гравитационных процессов, протекающих в песчаных грунтах в условиях покрытого карста // Моделирование формирования

суффозионных и карстовых полостей: тезисы докл. семинара (29-30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979. С. 57-59.

160. *Хоменко В.П.* Исследования карстово-суффозионных процессов с целью прогноза развития их поверхностных проявлений. Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. М.: ППНИИС, 1981. 21 с.

161. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.

162. *Хоменко В.П.* Нормативная оценка карстовой опасности: кризисная ситуация // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 240-245.

163. *Хоменко В.П., Толмачев В.В.* О механизме карстовых разрушений // Строительство на закарстованных территориях. М., 1983. С. 3-15.

164. *Хортон Р.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. Пер. с англ. М.-Л., Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.

165. *Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н.* Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – Киев, 2007. – 120 с.

166. *Шестопалов В.М., Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н.* Оценка уязвимости подземных вод районов открытого карста (на примере массива Ай-Петри, Крым) // Спелеология и карстология, № 2, Симферополь, 2009. С. 11-29.

167. *Шимановский Л.А.* Тектоническая трещиноватость Уфимского плато и ее роль в формировании рельефа // Материалы IV Всеуральского совещания по вопросам географии и охраны природы. Уфа, 1961.

168. *Шимановский Л.А.* Опыт геоморфологического районирования юга Пермской области // Материалы IV Всеуральского совещания по вопросам географии и охраны природы. Уфа, 1961.

169. *Шимановский Л.А., Михайлов Г.К., Шимановская И.А.* Гидрогеохимия зоны гидрогенеза // Химическая география вод и гидрогеохимия Пермской области. Вып. 4 (5). Пермь, 1967.

170. *Шимановский Л.А., Шимановская И.А.* Пресные подземные воды Пермской области. Пермь: Перм. книжное изд-во, 1973. 197 с.

171. *Шкляев А.С., Балков В.А.* Климат Пермской области. Пермь, 1963. 192 с.

172. *Шурубор А.В.* Трещинно-карстовые воды хлоридно-натриево-кальциевой гидрохимической фации // Карст Урала и Приуралья: матер. Всеуральского совещания, ноябрь, 1968 г. Пермь, 1968. С. 45-49.

173. 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. Перм. ун-т. – Пермь, 2010. С. 265-268.

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

175. Щербаков С.В. Характеристика подземной закарстованности Полазненского полуострова // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «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).

176. Щербаков С.В. Методика комплексной оценки карстоопасности урбанизированных территорий // Материалы Международного 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).

177. 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_geoecology/513.pdf] (дата обращения: 23.10.2012).

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

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

180. 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).

181. Щербаков С.В., Золотарев Д.Р. Прогнозирование устойчивости закарстованных территорий (на примере г. Кунгур) // Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых геологического факультета. ПГУ, 2008. С. 164-168.

182. *Щербаков С.В., Золотарев Д.Р.* Карст и его прогнозирование с учетом геолого-структурных условий территории (на примере г. Кунгур) // 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].

183. *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 Пермск. ун-та, 2008. С. 306-312.

184. *Щербаков С.В., Катаев В.Н.* Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2011. Том 153, кн. 1. С. 203-224.

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

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

187. *Щербаков С.В., Катаев В.Н.* Прогнозирование основных морфометрических параметров карстовых форм // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: материалы Международной научно-практической конференции «ГЕОРИСК–2012». В 2-х т. Т. 1. М.: РУДН, 2012. С. 260-264.

188. Эзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. *В.М. Кутенова, А.И. Шеко*. М.: Изд. фирма «КРУК», 2002. 348 с.

189. *Яковенко П.И.* Сульфатный карст среднего Предуралья и оценка устойчивости железнодорожных сооружений. Канд. диссертация, Свердловск, 1968. 362 с.

190. *Яковенко П.И.* Инженерно-геологическая оценка закарстованной территории в районе г. Чусового // Вопросы инженерного карстоведения. Тезисы докл. к инженерно-геологическому совещанию в г. Кунгуре (14-15 июня 1972 г.). Кунгур, 1972. С. 24-25.

191. *Albert C.H., Thuillier W.* Favourability functions versus probability of presence: advantages and misuses // *Ecography*. № 31, 2008. P. 417-422.

192. *Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.T.J., Hackett G.* DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600 & 2-878-036. 1987.

193. *Bahtuarevich A.* Sinkhole Density of the Forest City Quadrangle // Engineering and environmental impacts of sinkholes and karst. 3rd Multidisciplinary Conference on Sinkholes, St. Petersburg Beach, Florida, 2-4 October 1989. Rotterdam, Netherlands 1989. P. 75-82.

194. *Beck B.F.* (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. 429 pp.

195. *Beck B.F., Wilson W.L.* (eds) Karst Hydrogeology: Engineering and Environmental Applications. Proceedings of the Second Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst, Orlando, FL, A.A. Balkema. Rotterdam, The Netherlands, 1987. 475 pp.

196. *Benson R.C., La Fountain L.J.* Evaluation of subsidence or collapse potential due to subsurface cavities // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 177-182.

197. *Clark P.J., Evans F.C.* Distance to nearest neighbor as measure of spatial relationships in populations // Ecology. № 35, 1954. P. 445-453.

198. *Chen J., Beck B.F.* Qualitative modeling of the cover collapse process // Engineering and environmental impacts of sinkholes and karst. 3rd Multidisciplinary Conference on Sinkholes, St. Petersburg Beach, Florida, 2-4 October 1989. Rotterdam, Netherlands 1989. P. 89-95.

199. *Chung C.F., Fabbri F.* Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models // Landslide Hazard and Risk. Glade T., Anderson M.G., Crozier M.J. (eds). Wiley: New York, 2005. P. 139-174.

200. *Cooper A.H.* The GIS Approach to evaporate-karst geohazards in Great Britain // Environmental Geology, v. 53, 2008. P. 981-992.

201. *COST-Action 65.* Karst groundwater protection. Final Report. European Commission Report EUR 16547 EN, Brussels-Luxemburg, 1995.

202. *COST 620.* Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final Report. 2003.

203. *Cramer H.* Die Systematik der Karstdolinen unter Berücksichtigung der Erdfälle. N. Jb. Min. Geol., Abt. B, 85, Stuttgart, 1941. P. 293-382.

204. *Cucchi F., Forti P., Zini L.* The vulnerability of complex karst hydrostructures: problems and perspectives // Geofisica Internacional. Vol. 43, № 4, 2004. P. 533-540.

205. *Dalgleish J., Alexander E.C.* Sinkhole distribution in Winona County, Minnesota // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 79-85.
206. *Day M.* Predicting the location of surface collapse within karst depressions // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 147-151.
207. *Denizman C.* Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee river basin, Florida // Journal of Cave and Karst Studies, vol. 65, № 1, 2003. P. 29-35.
208. *Doerfliger N., Zwahlen F.* EPIK: a new method for outlining of protection areas: a water vulnerability assessment in karst environment // Proc. 5th Int. Symp. on Karst Waters and Environmental Impacts, Antalya, sept. 1995, Balkema, Rotterdam, 117-123.
209. *Doerfliger N., Jeannin P.Y., Zwahlen F.* Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method) // Environ. Geol., 39(2), 1999. P. 165-176.
210. *Edmonds C.N.* Predicting natural cavities in chalk // Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications. № 18, 2001. P. 29-38.
211. *Fairbridge R.W.* The Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold, New York, 1968. 1295 pp.
212. *Farrant A.R., Cooper A.H.* Karst geohazard in the UK: the use of digital data for hazard management // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 41, 2008. P. 339-356.
213. *Fenk J.* Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge. Freiburger Forschungshefte, A639: 138. S.: Freiberg, 1981.
214. *Field M.S.* A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology. US Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Washington, DC, 2002. 214 pp.
215. *Fisher J.A., Greene R.W.* New Jersey sinkholes: distribution, formations, effects – Geotechnical Engineering // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 159-165.
216. *Fleury S.* Land Use Police and Practice on Karst Terrains. Living on Limestone. – Springer Science, 2009. 153 p.
217. *Forth R.A., Butcher D., Senior R.* Hazard mapping of karst along the coast of the Algarve, Portugal // Engineering Geology. № 52, 1999. P. 67-74.
218. *Fritz R., Stoyan D.* Mathematic-statistical investigations for describing regularities of karsification phenomenons in carbonate and sulphate rocks // Proceedings Intern. Symp. «Engineering Geology of Karst». Perm, 1993. V. 1. P. 139-150.

219. Galve J.P., Gutierrez F., Lucha P., Guerrero J., Bonachea J., Remondo J., Cendrero A. Probabilistic sinkhole modeling for hazard assessment // *Earth Surface Processes and Landforms*. № 34, 2009. P. 437-452.
220. Galve J.P., Gutierrez F., Cendrero A., Remondo J., Bonachea J., Guerrero J., Lucha P. Predicting sinkholes by means of probabilistic models // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. № 42, 2009. P. 139-144.
221. Galve J.P., Gutierrez F., Remondo J., Bonachea J., Lucha P., Cendrero A. Evaluating and comparing methods of sinkholes susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporate karst (NE Spain) // *Geomorphology*. № 111, 2009. P. 160-172.
222. Gilbrich W.H., Zaporozec A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability // IAH, International contributions to hydrogeology 16, Hannover. P. 1-2.
223. Gracia-Prieto F.J. Criterios de clasificación morfométrica de campos de dolinas // *Cuaternario y Geomorfología*. № 5, 1991. P. 65-76.
224. *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Practical Guide. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), 1998, 56 p.
225. Gutierrez-Santolalla F., Gutierrez-Elorza M., Marin C., Desir G., Maldonado C. Spatial distribution, morphometry and activity of La Puebla de Alfinden sinkhole field in Ebro river valley (NE Spain): applied aspects for hazard zonation // *Environmental Geology*. № 48, 2005. P. 360-369.
226. Gutierrez-Santolalla F., Gutierrez-Elorza M., Marin G., Maldonado C., Younger P.L. Subsidence hazard avoidance based on geomorphological mapping in the Ebro River valley mantled evaporate karst terrain (NE Spain) // *Environmental Geology*. № 48, 2005. P. 370-383.
227. Gutierrez F., Guerrero J., Lucha P. Quantitative sinkhole hazard assessment. A case study from the Ebro Valley evaporate alluvial karst (NE Spain) // *Natural Hazards*, 2008. 45. P. 211-233.
228. Gutierrez F., Cooper A.H., Johnson K.S. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporative karst areas // *Environmental Geology*. Vol. 53, 2008. P. 1007-1022.
229. Gyoo Bum-Kim, Jin-Yong Lee, Kang-Kun Lee. Constructions of Lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue scripts // *Computers & Geosciences*. Volume 30, Issues 9-10, 2004. P. 1117-1126.
230. Hermann R. Uber Erdfalle aussert tiefen Ursprungs. Notizbl. hess. L.-Amt. f. Bodenforsch, Wiesbaden, № 100, 1972. P. 177-193.
231. Hu R.L., Yeung M.R., Lee C.F., Wang S.J., Xiang J.X. Regional risk assessment of karst collapse in Tangshan, China // *Environmental Geology*. № 59, 2001. P. 1377-1389.
232. Hubbard D.A. Sinkhole distribution in the central and northern Valley and Ridge province, Virginia // In Beck B.F. (ed.) *Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact*.

Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 75-78.

233. *Karimi H., Tahiti K.* Hazards and mechanism of sinkholes on Kabudar Ahang and Famenin plains of Hamadan, Iran // *Natural Hazards*. № 55, 2010. P. 481-499.

234. *Kataev V.N.* The methodological aspects of karst massif investigation // *Proceedings Intern. Symp. «Engineering Geology of Karst»*. Perm, 1993. V. 1. P. 108-114.

235. *Kaufmann O., Quinif Y.* Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the «Tournaisis» area, Southern Belgium // *Environmental Geology*. № 65, 2002. P. 117-124.

236. *Kemmerly P.R.* Sinkhole hazard and risk assessment in a planning context // *Journal of the American Planning Association*. № 59(2), 1993. P. 221-229.

237. *Keqiang H., Rulin D., Wenfu J.* Contrastive analysis of karst collapses and the distribution rules in Northern and Southern China // *Environmental Earth Sciences*. № 59, 2010. P. 1309-1318.

238. *Kocal A., Duzgun H.S., Karpuz C.* Discontinuity mapping with automatic lineament extraction from high resolution satellite imagery // *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*. Volume 35, part 7, 2004. P. 1073-1078.

239. *Lamoreaux P.E., Newton J.G.* Catastrophic subsidence: an environmental hazard, Shelby County, Alabama // *Environmental Geology and Water Sciences*. № 8, 1986. P. 25-40.

240. *Lei M., Jiang X., Yu L.* New advances in karst collapse research in China // *Environmental Geology*. № 42, 2002. P. 462-468.

241. *Leibundgut C.* Vulnerability of karst aquifers. *Karst Hydrology (Proceedings of Workshop W2 held at Rabat, Morocco, April-May 1997)*, IAHS Publ. no 247, 1998. P. 45-60.

242. *Lerche I., Lempp C.* Methods for estimating associated risks of sinkhole occurrences: a demonstration using available data from the Ruhr Valley region of Germany // *Environmental Geosciences*. № 9, issue 4, 2002. P. 173-183.

243. *Liszkowsky J.* Bemerkungen über die Geomechanik von Ordfällen // *Simp. of the IAEG. Sinkholes and subsidence. Eng.-geol. problems related to soluble rocks*. Hannover, 1974. s. 12-16.

244. *Lowe D., Waltham T.* *Dictionary of Karst and Caves: a brief guide to the terminology and concepts of Cave and Karst sciences*. Cave Studies Series Number 6. British Cave Research Association. London, Britain, 1995. 41 pp.

245. *Magdalene S., Alexander E.C.* Sinkhole distribution in Winona County, Minnesota revisited // In: Beck B.F., Person F.M. (Eds.). *Karst Geohazards*. Balkema, Rotterdam, 1995. P. 43-51.

246. *McConnell H., Horn J.M.* Probabilities of surface karst // In Chorley R.J. (ed.) *Spatial Analysis in Geomorphology, Part II – Point Systems*. Methuen, London, 1972. P. 111-133.

247. *Monroe W.H.* *A Glossary of Karst Terminology*. US Geological Survey Water Supply Paper. GV Print, Washington, 1970. 26 pp.

248. *Nisio S., Caramanna G., Ciotoli G.* Sinkholes in Italy: first results on the inventory and analysis // Geological Society, London, Special Publications. № 279, 2007. P. 23-45.
249. *Ogden A.E.* Methods for describing and predicting the occurrence of sinkholes // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 177-182.
250. *Pulina M.* The Eastern Siberian karst, 1968.
251. *Quinlan J.F., Smart P.L., Schindel G.M., Alexander E.C. Jr, Edwards A.J, Smith A.R.* Recommended administrative regulatory definition of karst aquifers, principles for classification of carbonate aquifers and practical evolution of vulnerability of karst aquifers. In: Proceeding of the 3rd Conf. on Hydrogeology, Geology and Management of Groundwater in Karst Terrains. Natinal Water Well Association. Dublin, Ohio, 1991. P. 573-635.
252. *Real R., Barbosa A. M., Vargas J. M.* Obtaining environmental probability functions from logistic regression // Environmental and Ecological Statistics. № 13, 2006. P. 237-245.
253. *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, 2011b. Delegate Papers. Moscow, 2011. P. 236-240.
254. *Soriano M.A., Simon J.L.* Alluvial dolines in the central Ebro Basin, Spain: spatial and environmental hazard analysis // Geomorphology. № 11, 1995. P. 295-309.
255. *Tan Boon-Kong.* Environmental Geology of Limestone in Malaysia. IGCP448 «World Correlation on Karst Geology and Its Relevant Ecosystems», 2002. P. 54-67.
256. *Thorp M.J.W., Brook G.A.* Application of double Fourier series analysis to ground subsidence susceptibility mapping in covered karst terrains // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 197-200.
257. *Troester J.W., White E.L., White W.B.* A comparison of sinkhole depth frequency distributions in temperate and tropic karst regions // In Beck B.F. (ed.) Sinkholes: their Geology, Engineering and Environmental Impact. Proceedings of the First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Florida, Balkema Press, 1984. P. 65-73.
258. *Upchurch S.B., Littlefield J.R. JR.* Evaluation of data for sinkhole-development risk models // Environmental Geology and Water Sciences. № 12(2), 1988. P. 135-140.
259. *Veni G.* Fracture permeability: implications on cave and sinkhole development and their environmental assessment // In: Proceedings of 2nd Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst. Orlando, FL, 1987. P. 101–108.
260. *Venkatanarayana B., Venkateswara Rao T.* Geological and geophysical investigations for delineating karstic structures in southwestern portion of Cuddapah Basin, Andhra Pradesh, India //

Engineering and environmental impacts of sinkholes and karst. 3rd Multidisciplinary Conference on Sinkholes, St. Petersburg Beach, Florida, 2-4 October 1989. Rotterdam, Netherlands 1989. P. 59-72.

261. *Williams P.W.* Morphometric analysis of polygonal karst with examples from New Guinea // Geological Society of America. Bulletin, vol. 83, 1972. P. 761-796.

262. *Williams P.W.* The analysis of spatial characteristics of karst terrains // In Chorley, R.J., ed., Spatial Analysis in Geomorphology: London, Methuen, 1972, P. 135-163.

263. *Wilson W.L.* Sinkhole and buried sinkhole densities and new sinkhole frequencies in karst of northwest Peninsular Florida // Karst GeoHazards: engineering and environmental problems in karst terrains. Beck (ed.), 1995. P. 79-91.

264. *Yongli G., Calvin A. Jr.* The development of the karst features database for southeastern Minnesota // Journal of Cave and Karst Studies. № 64(1), 2002. P. 51-57.

265. *Zhou W., Beck B.F., Adams A.L.* Application of matrix analysis in delineating sinkhole risk areas along highway (I-70 near Frederick, Maryland) // Environmental Geology. № 44, 2003. P. 834-842.

В. Фондовая

266. *Дублянская Г.Н.* (научный руководитель), *Коноплев А.В. и др.* Научно-техническое обоснование приоритетных мер защиты г. Кунгур от вредного влияния паводковых вод рр. Сылва, Ирень, Шаква. Отчет ФГНУ «ЕНИ», Пермь, 2005.

267. *Дублянская Г.Н. и др.* Проведение исследования для обоснования возможности строительства малоэтажного усадебного жилья с полным благоустройством д. Поповка, д. Шарташи. Отчет о НИР по государственному контракту №30/2007 от 02.07.2007. ГОУ ВПО «Пермский государственный университет». Пермь, 2007.

268. *Катаев В.Н. и др.* Мониторинг закарстованных территорий Пермской области (2006-2010). Отчет о НИР по государственному контракту №4 от 15.02.2006. ГОУ ВПО «Пермский государственный университет». Пермь, 2010.

269. *Катаев В.Н. и др.* Комплексная оценка гидрогеологического и инженерно-геологического состояния территории промышленной площадки филиала «Азот» ОАО «Объединенная химическая компания «УРАЛХИМ» в г. Березники и разработка мер по предупреждению развития опасных геологических процессов. Отчет о по договору № 11/2100-11/0003 от 30 сентября 2011 г. ФГБОУ ВПО «ПГНИУ». Пермь, 2012.

270. Отчет по инженерно-геологическим изысканиям на объекте: «Клуб на 300 мест в с. Карьево Ординского района». ОАО «ВерхнекамТИСИз», Пермь, 1983. Архивный номер 8772.

271. Отчет по инженерно-геологическим изысканиям на объекте: «Строительство водовода для обеспечения водоснабжения системы ППД Солдатовского месторождения». ООО «ПИФ КАРБОН», Ижевск, 2011.

272. Отчет по инженерно-геологическим изысканиям на объекте: «Строительство и обустройство поглощающих скважин №№ 5000-бис и 5001-бис Кокуйского месторождения». ООО «ПИФ КАРБОН», Ижевск, 2011.

273. Гидрогеологическая карта Урала (лист XXXIII).