

На правах рукописи



Соколова Ираида Александровна

**ОЦЕНКА КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ  
В ЗАРЕЧНОЙ ЧАСТИ НИЖНЕГО НОВГОРОДА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 25.00.08 — Инженерная геология,  
мерзлотоведение и грунтоведение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва — 2010

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «ПНИИИС»

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук  
**Виктор Петрович Хоменко**

**Официальные оппоненты:**

доктор геолого-минералогических наук, профессор  
**Рэм Сабирович Зиангиров**

кандидат геолого-минералогических наук  
**Николай Алексеевич Мионов**

**Ведущая организация:**

ОАО «Противокаровая и береговая защита»

**Защита диссертации состоится 30 сентября 2010 г. в 15 часов 00 минут в ауд. 5-49 на заседании диссертационного совета ДМ 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ

Отзывы на автореферат в 2<sup>x</sup> экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.121.01.

Автореферат разослан “\_25\_”августа 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент



О.Е.Вязкова

Постоянный рост объемов инженерно-геологических изысканий и, как следствие, увеличение инженерно-геологической информации сделали **актуальной** задачу систематизации и анализа инженерно-геологических материалов прошлых лет, их использование для проведения текущих работ, построения прогнозных карт, ведения мониторинга опасных геологических процессов для целей градостроительства. Формирование пространственных инженерно-геологических данных является одной из основ, используемой в градостроительной деятельности. Применение геоинформационных технологий увеличивает эффективность и качество систематизации, анализа, ввода, хранения и обработки геологических материалов. Это предопределило **актуальность исследований**. Важным направлением этой работы является оценка влияния опасных геологических процессов (ОГП) на городскую территорию, в частности, оценка ее устойчивости к карстовым процессам путем зонирования территории, прогнозирование провалообразования, что, в свою очередь необходимо для принятия решения по выбору площадки для строительства с точки зрения технико-экономического обоснования.

**Цель работы** – оценка карстовой опасности для объектов промышленного и гражданского строительства и исследование влияния природных факторов на провалообразование с применением ГИС на основе банка данных геологической информации (на примере Заречной части Нижнего Новгорода).

**Основные задачи исследования:**

1. Анализ опыта использования ГИС-технологий для оценки карстовой опасности.
2. Сбор, анализ и систематизация сведений о геологическом, гидрогеологическом, тектоническом строении территории, результатов исследований, проведенных для изучения карста. Определение условий и факторов развития карста Заречной части города. Структурирование данных инженерно-геологических изысканий.
3. Оценка карстовой опасности Заречной части города.
4. Построение цифровых карт природных факторов, оценка влияния этих факторов на провалообразование (участок Автозаводского района Заречной части города).

**Методы исследований** – работа выполнена в программном комплексе «Карта 2005» (разработка КБ «Панорама», г. Ногинск), предназначенном для создания и редактирования карт, решения прикладных задач и разработки специализированных ГИС-приложений.

**Фактическая основа исследований** – в основу исследований положены архивные материалы ОАО «НижегородГИСИЗ»: отчеты по объектам промышленного и гражданского строительства, тематические работы, проведенные для

изучения карста и оценки карстовой опасности в Заречной части Нижнего Новгорода.

### **Научная новизна.**

1. Разработаны методические приемы районирования Заречной части города по карстовой опасности и моделирования геологической среды для проверки правильности представлений о влиянии природных факторов на карстовое провалообразование с использованием ГИС.

2. Выявлены тенденции в формировании поверхностных карстопроявлений Заречной части Нижнего Новгорода. Это позволяет во многих случаях проводить инженерно-геологические аналогии с использованием относительно хорошо изученных закономерностей провалообразования в карстовом районе Дзержинска.

3. Установлено, что образование карстовых провалов маловероятно при мощности глин, перекрывающих растворимые породы, более 10 м, что совпадает с пороговым значением мощности для г. Москвы. Объективность этого критерия подтверждена в результате применения ГИС-технологий.

### **Защищаемые положения:**

1. Применение ГИС-технологий для оценки карстовой опасности требует не только создания четкой системы ввода, организации и хранения данных, получаемых в ходе инженерно-геологических изысканий, но и глубокого понимания особенностей развития карста и формирования его подземных и поверхностных проявлений, характерных для исследуемой территории.

2. Особенности формирования карстовых провалов в Заречной части Нижнего Новгорода отражает карта районирования этой территории по карстовой опасности, построенная с применением ГИС-технологий на основе определенных принципов, учитывающих опыт оценки карстовой опасности на территории Москвы.

3. Сравнительный анализ построенных с помощью ГИС-технологий двухмерных цифровых моделей карт позволил: а) дать количественную оценку влияния природных факторов на интенсивность карстового провалообразования для одного из участков Заречной части Нижнего Новгорода; б) сделать вывод о том, что провалообразование маловероятно там, где мощность глин, перекрывающих карстующиеся породы, превышает 10 м; в) выявить тенденции в формировании карстовых провалов на исследуемой территории, аналогичные тенденциям, характерным для территории Дзержинска Нижегородской области.

### **Практическая ценность работы.**

Предложенные автором принципы моделирования геологической среды с применением ГИС используются для построения геологических карт. Созданная автором технологическая схема построения электронной модели карты

районирования по карстовой опасности, являющейся важным элементом комплексной строительной оценки территории, может использоваться при создании таких карт на других территориях. Методические приемы структурирования архивных материалов могут эффективно применяться при создании электронных геологических фондов в трестах инженерно-строительных изысканий. Метод оценки влияния природных факторов на провалообразование с применением ГИС может быть использован для получения дополнительной информации о формировании провалов, что необходимо для их обоснованного прогнозирования и рационального выбора защитных мероприятий.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Представленные в данной работе результаты используются в ОАО «НижегородГИСИЗ» при решении производственных задач, создании фондов ГИС ГЕОТОП «Инженерные изыскания» по архивным материалам этой изыскательской организации и для построения электронных геологических карт на территорию города.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на научно-практической конференции молодых ученых в ОАО «ПНИИИС» (г. Москва, апрель 2006 г.); VI межрегиональной научно-практической конференции Департамента архитектуры и градостроительства Нижегородской области «Новые информационные технологии – инструмент повышения эффективности управления» (г. Нижний Новгород, апрель 2007 г.); IV общероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (г. Москва, 18-19 декабря 2008 г.).

**Публикации** - по теме диссертации автор имеет 9 публикаций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц и 14 рисунков, 6 приложений. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего 115 наименований.

**Благодарности.** Особую благодарность автор приносит В.В. Толмачеву (ОАО «Противокарстовая и береговая защита», г. Дзержинск) за информационную поддержку и ценные советы и своему научному руководителю. В.П. Хоменко (ОАО «ПНИИИС») за постоянную помощь и консультации. Автор приносит благодарность руководству и коллективу ОАО «НижегородГИСИЗ» за предоставление необходимых архивных материалов и техническую поддержку, а также хотел бы особо отметить неоценимую помощь в работе над диссертацией, оказанную начальником производственно-технического отдела Л.А. Кириенко. Автор глубоко признателен Н.Л. Шешене, А.Н. Хацкевичу, С.Н. Титкову (ОАО «ПНИИИС»), В.В. Дмитриеву (РГГРУ) за ценные рекомендации и конструктивную критику рукописи.

## Глава 1.

### АНАЛИЗ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ

В настоящее время за рубежом накоплен огромный опыт применения геоинформационных систем (ГИС) в карстоведении. Этот опыт весьма полезен и вполне применим в условиях нашей страны.

С 1984 г. в США проводятся регулярные национальные конференции по прикладным проблемам карста под названием «Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst», которые всегда были открыты для специалистов других стран. По опубликованным докладам всех прошедших конференций, представленным в 11-ти сборниках, вполне можно судить об уровне карстологических исследований не только в США, но и во всем мире.

С 1990 г. многие страны использовали ГИС при разработке базы данных по карсту «KEDS», предназначенной для пространственного анализа данных и управления национальными геологическими ресурсами. Используя систему управления базой данных «DBMS» в ряде государств разработано и применяется математическое моделирование (Gao, Alexander, 2001; Lei et al., 2001).

В США для штата Миннесота (Gao, Alexander, 2001) создана база данных признаков карста, включающая провалы, родники, западины, выходы на дневную поверхность, слепые долины, сухие долины и создана карта в цифровом виде. Используя базу данных, авторы с помощью программ «ArcInfo» и «ArcView» проводили сортировку признаков карста по возрасту, мощности осадочного чехла, литологии коренных пород, а затем анализ каждого из параметров. Для анализа результатов применялась программа профессора Р. Барнса (R. Barnes), которая использует координаты провалов для вычисления направления и расстояния к ближайшему соседу каждого провала.

В штате Кентукки создана база данных проявлений карста на основании дешифрирования аэрофотоснимков, топографической карты и детальных полевых изысканий (Krokonko, Weber, Gilbert, 2005). В нее внесена информация, характерная для карстопоявлений: тип, координаты, размеры; глубина залегания кровли коренных пород; возраст и вид грунта. На основании этой базы с использованием модулей «Spatial Analyst» и «Geostatistical Analyst» программы «ArcGIS» выявлены области низкой, умеренной и очень высокой закарстованности, районы молодого и зрелого карстового ландшафта.

В BGS (Британская геологическая служба) созданы цифровые модели геологических карт масштаба 1:50000 и проведено 3D моделирование грунтовых толщ на территории Великобритании в программе «ArcView» (Cooper et al., 2001). Разработаны геологические базы данных, в том числе по карстопоявлениям, что позволяет провести запрос и просмотр информации по карстовым процессам в любой точке территории, выявить связь с геологическим строением, гидрологическими и гидрогеологическими условиями.

С 1997 г. в институте геологии карста Китая создаются локальные и национальные базы данных по провалам. В настоящее время разработана методика оценки риска провалообразования для всего Китая с использованием ГИС «ArcView» и АНР – методики принятия решений по множеству критериев (Saaty, 1980, 1990, 1994). Факторы оценки риска включают: типы карбонатных пород, геоморфологическое положение, гидрогеологические условия, наличие горнодобывающей промышленности, автодорог и железных дорог. Все данные были представлены в виде цифровых карт масштаба 1:4000000 как соответствующие покрытия ГИС, установлены значения веса каждого фактора в развитии карста и рассчитан относительный риск провалообразования для каждого фактора. В результате такой оценки было выделено 5 зон: очень высокого риска, высокого риска, среднего риска, низкого риска и очень низкого риска провалоопасности.

Главными направлениями в рассматриваемой области являются: разработка баз данных, оценка карстовой опасности и риска, выявление влияния природных факторов на провалообразование.

## Глава 2.

### УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ КАРСТА

Основные условия развития карста впервые сформулированы Ф.П. Саваренским (1934), а наиболее полно раскрыты и обоснованы Д.С. Соколовым (1962). Это – наличие растворимых пород, их водопроницаемость, движение подземных вод и их растворяющая способность. Эти условия определяются и контролируются многочисленными природными и техногенными факторами, роль которых в разных комплексах пород, структурах, гидрогеологических условиях и климатических зонах различна.

Рельеф и гидрография. Заречная часть Нижнего Новгорода расположена в низменном междуречье рек Волги и Оки и занимает пойму, первую, вторую и частично третью надпойменные террасы. Рельеф осложнен большим количеством стариц, болот, озер, мелкими реками и искусственными каналами. Озера часто имеют карстовое происхождение. Наиболее крупными техногенными формами рельефа являются насыпи, карьеры и дамбы. Карстовые формы рельефа представлены воронками (провалами), просадками и оседаниями.

Геологическое строение. В Заречной части города мощная толща песчаных аллювиальных четвертичных отложений подстилается глинистыми верхнепермскими породами татарского яруса, а на других залегает непосредственно на карстующихся карбонатных породах казанского яруса верхней перми (мощностью до 25 м) или (там, где они отсутствуют) на сульфатных породах сакмарского яруса нижней перми. Толща четвертичных пород (мощность 20-50 м) представлена в основном аллювиальными песками разной крупности. Татарские отложения не выдержаны по простиранию (мощность 0-42 м), в них встре-

чаются каверны. Для карбонатных и верхней части сульфатных отложений, характерно развитие многоярусных карстовых полостей (до 6) суммарной высотой до 10 м, заполненных водой, переотложенным материалом, зон дробления, выщелачивания.

Тектоника и неотектоника. Территория Нижнего Новгорода расположена в пределах Токмовского свода, входящего в состав Волго-Уральской антеклизы. Кристаллический фундамент имеет блочное строение и состоит из Горьковского мезоблока, который Горьковско-Городецким разломом делится на Окско-Волжской и Линдовско-Керженский блоки второго порядка. Блоки третьего порядка (из которых наиболее опущен Пырский, а наиболее поднят Нижегородский) контролируются разрывными нарушениями северо-восточного простираения и разбиты второстепенными разрывными нарушениями на ряд более мелких блоков. Разрывные нарушения в осадочном чехле преимущественно северо-западного и северо-восточного простираения фиксируются в основном зонами повышенной трещиноватости, расположенными над разломами, выделенными в кристаллическом фундаменте.

Значительное проявление неотектонических движений выражено в ярусности рельефа. Рельеф характеризуется наличием двух орографических областей в пределах города: Приволжской возвышенности (Нагорная часть) и Волго-Унжинской низины (Заречная часть). В Нагорной части (правобережье Оки) преобладает денудационный рельеф с абсолютными отметками от 80 до 210 м. В пределах Заречной части рельеф аккумулятивный, абсолютные отметки колеблются от 70 до 90 м. На формирование рельефа исследуемой области влияли различные по знаку и амплитуде неотектонические движения, о чем свидетельствует лестница речных террас. Наибольшая закарстованность Заречной части города приурочена к участкам сильнорасчлененного рельефа кровли карстующихся пород в пределах пра-Волги.

Гидрогеологические условия. Наибольшее значение для образования карста имеют два мощных водоносных горизонта: грунтовых и трещинно-карстовых вод. Они часто бывают гидравлически связаны между собой.

Для грунтовых вод характерно зональное строение: в верхней части водовмещающих песков преобладают воды гидрокарбонатно-кальциевого состава с минерализацией 0,2-0,3 г/л и с коэффициентом фильтрации ( $K_f$ ) до 3 м/сут, часто с высоким содержанием нитратов и аммония; в нижней – воды сульфатно-кальциевого состава с минерализацией до 2 г/л ( $K_f$  до 50 м/сут). Питание горизонта идет за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка в реки, глубина залегания уровня грунтовых вод составляет 0,2-10,0 м. Воды агрессивны по отношению к карбонатным породам, и в разной степени агрессивны по отношению к сульфатным породам.

Трещинно-карстовые воды нижеказанских отложений вскрыты на глубинах от 27 до 74 м, пьезометрический уровень устанавливается на глубинах 0,7–11,0 м. Воды напорные, с минерализацией от 0,5 до 3,5 г/л,  $K_f$  изменяется



от 7 до 61 м/сек. Разгрузка вод осуществляется в долины рек Волги и Оки, в бортах эрозионного размыва на севере Заречной части (в местах отсутствия казанских отложений). Область питания находится в районе Алатырско-Горьковского поднятия. Воды агрессивны по отношению к карбонатным породам, и имеют разную степень агрессивности к сульфатным породам.

Галогеновая гипсово-ангидритовая толща сакмарского яруса нижней перми служит региональным водоупором. На участках развития в верхней части толщи трещиноватости, кавернозности воды нижеказанских и сакмарских отложений рассматриваются как единый трещинно-карстовый водоносный горизонт. Напорные воды вскрыты на глубинах от 32 до 80 м, пьезометрический уровень устанавливается на глубинах от 0,1 до 7,0 м, минерализация в пределах 1,2-3,5 г/л. Воды агрессивны по отношению к карбонатным породам.

**Техногенные факторы.** На интенсивность карстовых процессов при техногенных воздействиях влияют следующие факторы (Толмачев и др., 1986): а) повышение скорости растворения карстующихся пород в результате изменения скоростей движения подземных вод и повышение скорости подземной эрозии в результате выноса заполнителя из карстовых полостей и трещиноватых зон, что бывает вызвано утечками из водопроводных сетей, эксплуатационными откачками трещинно-карстовых вод и др.; б) разрушение кровли полостей при увеличении статических напряжений в грунтах, при повышении уровня надкарстовых вод и при динамических воздействиях (строительные работы, эксплуатация зданий и сооружений, утечки из водопроводных сетей, намыв искусственных террас и др.); в) развитие процессов суффозии в результате изменения уровней надкарстовых и трещинно-карстовых вод (эксплуатация трещинно-карстовых вод и др.); г) разжижение водонасыщенных песков вследствие динамического воздействия на грунты (забивка и вибропогружение свай и др.).

Основные условия и факторы, благоприятствующие развитию карста в Заречной части города, представлены в таблице 1.

**Таблица 1.**

**Условия и факторы благоприятные для развития карста**

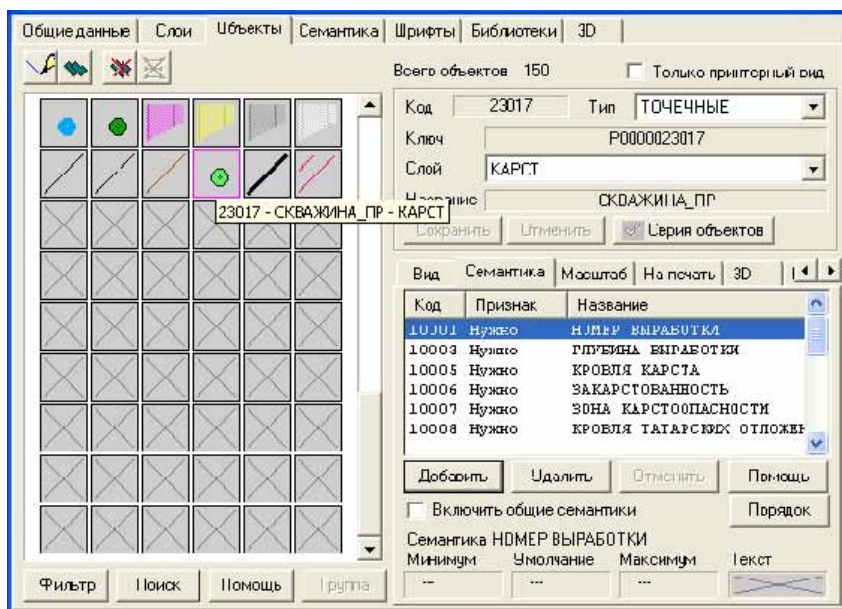
Природные	Техногенные
1. Наличие песчаных водопроницаемых покровных отложений	1. Повышение скорости растворения карстующихся пород
2. Отсутствие или малая мощность глинистых отложений, перекрывающих растворимые породы	2. Повышение скорости подземной эрозии
3. Отсутствие или малая мощность карбонатных отложений	3. Разрушение кровли полостей (повышение нагрузки на кровлю полости)
4. Расположение карстующихся пород в зоне дренирования рек Волги и Оки и участков эрозионного размыва в пределах пра-Волги	4. Развитие процессов суффозии
5. Тектоническая трещиноватость пород (разрушенные зоны, полости заполненные водой или переотложенным материалом).	5. Возникновение разжижения водонасыщенных песков вследствие динамического воздействия

### Глава 3.

## СТРУКТУРА И ОРГАНИЗАЦИЯ ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

В настоящее время инженерно-геологическое картографирование развивается на основе компьютерных банков данных. При этом первоначальной являются задачи создания классификатора объектов, системы ввода, организации и хранения данных.

**Классификатор.** В результате анализа методических рекомендаций и нормативных документов автор обобщил комплекс основных геологических факторов, используемых при построении инженерно-геологических карт. Структура электронного классификатора состоит из 8 слоев, в каждом из которых расположены характерные для данного слоя объекты. Слои имеют следующие названия: 1) «генетические типы»; 2) «геологические границы»; 3) «горные выработки»; 4) «грунты»; 5) «геоморфология»; 6) «гидрогеология»; 7) «стратиграфия»; 8) «литологические особенности». Слои и объекты могут добавляться, так для оценки карстовой опасности автор добавил слой «карст», содержащий объекты «карстовая воронка», «карстовый провал», «скважина» (вскрывшая полости, заполненные водой, переотложенным материалом и далее) и площадные объекты зон карстовой опасности – «опасный район», «потенциально опасный район», «неопасный район» (рис.1).



**Рис. 1.** Фрагмент структуры классификатора для создания карты районирования по карстоопасности масштаба 1:25000 (слой «Карст» - скважина, вскрывшая полости, заполненные переотложенным материалом)

Для каждого объекта разработан код, ключ, семантика, позволяющие осуществлять связь и проводить операции по выборке данных, построению карт, математическим расчетам. Классификатор создан в соответствии с государственными стандартами, регламентирующими инженерные изыскания в строительстве (ГОСТ 21.302-96, ГОСТ 25100-95). Условные обозначения воз-

раста выделяемых отложений соответствуют единой международной геохронологической шкале, генетические типы – общепринятой легенде четвертичных отложений.

Организация данных. В результате анализа и систематизации исходных материалов, представленных в отчетах, а также нормативных и методических документов, примененных при создании классификатора, автором разработана структура базы данных, основным принципом которой являлась оптимизация, совместимость со структурой классификатора и с возможностью использования модулей программного комплекса «Карта 2005». В точках, соответствующих горным выработкам, вводятся показатели в числовом или текстовом виде: общие данные (год проходки, глубина, организация, осуществлявшая проходку, и далее); условия залегания грунта (глубина подошвы, возраст, мощность и далее); описание грунта; физико-механические свойства грунта; коррозионная активность грунта; состав и свойства подземных вод. Для каждого вида грунта подбирается свой набор семантических характеристик, отражающих их структурно-текстурные особенности, состав, состояние и свойства. Семантические характеристики техногенных грунтов отражают также способ их укладки, однородность состава, степень и метод уплотнения, степень влажности. Вводятся расчетные характеристики физико-механических свойств грунта.

Фрагмент структуры базы данных по подземным карстопроявлениям в скважине представлен в виде формы просмотра данных (рис. 2).

**Скважина 461**

Архивный номер 14507      АО (м) 78.52  
 Номер заказа      Глубина, м 46.5

Организация "НижегородТИСИЗ"

	аО	N	P2t	P2kz	P2s	Карст
АО кровли (м)			57.72	53.22	41.02	53.22
Мощность (м)			4.5	12.2	9	
УПВ (м)	7.5		0	7	0	
Список АО кровли (м)						
Список мощность (м)						
Список УПВ (м)						

*Закрепленные зоны*

Зона	АО кровли (м)	Мощность (м)	Описание
Зона1	53.22	0.9	Доломит глинистый, разрушен до состояния песка реже муки
Зона2	51.02	0.4	Полость, заполненная водой
Зона3	50.62	1.6	Известняк пористый, разрушен до щебня
Зона4	78.52	0.9	Доломит известковистый, разрушен до щебня
Зона5	48.12	1	Мука доломитовая со щебнем доломита
Зона6	46.52	2.2	Мука доломитовая со щебнем доломита
Зона7	42.82	0.9	Разрушенная зона: песок доломитовый щебень доломита
Зона8	41.92	0.4	Полость, заполненная водой
Зона9	41.52	0.5	Доломит глинистый, разрушенный до муки и щебня
Зона10	0	0	

**Рис. 2. Форма просмотра: характеристика подземных карстопроявлений в скважине**

Ввод и хранение данных. Система ввода в банк геологических данных предусматривает импорт текущей геологической информации и ввод архивной информации с бумажных носителей. Текущая геологическая информация представляет собой результаты обработки первичных данных программными средствами, разработанными специалистами треста: «Колонка», «Статика», «Статистика», «Разрез», «Лаборатория». Структура данных текущей геологической информации ориентирована на структуру банка геологических данных. Хранение данных осуществляется в базе, состоящей из нескольких взаимосвязанных таблиц (\*db). Для ввода информации из отчетов и просмотра информации автор вместе с программистами треста разработал модуль «Паспорта точки» (рис. 3).

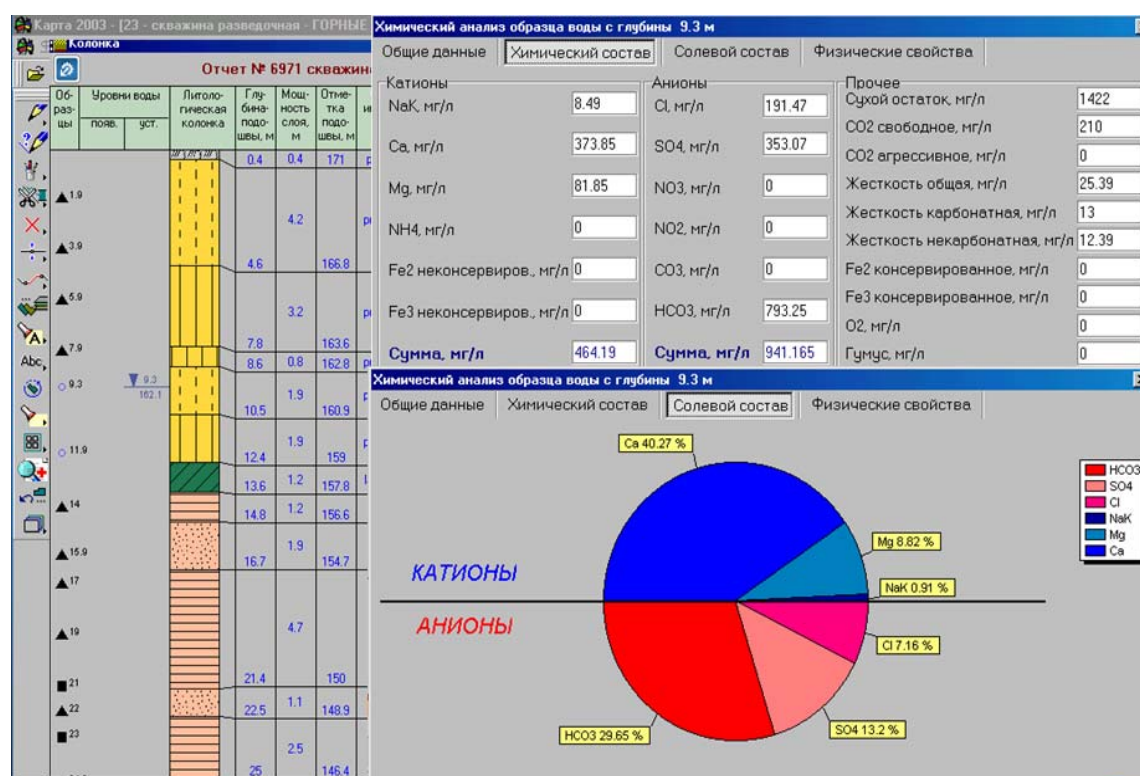


Рис. 3. Фрагмент электронного паспорта скважины с информацией о химическом составе подземных вод

## Глава 4.

### РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ

#### 4.1. Обоснование критериев оценки карстоопасности

В основу исследований положены принципы выделения районов карстовой опасности, разработанные для территории г. Москвы (Инструкция по проектированию..., 1984). Автор провел сравнительную оценку признаков, указывающих на возможность образования провалов для городов Москвы и Нижнего Новгорода (табл. 2).

Таблица 2.

## Признаки возможного провалообразования

г. Москва	Заречная часть г. Н. Новгорода
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 далее)	7. Наличие ослабленных зон в песчаной толще

Перечисленные признаки аналогичны в обоих городах, что позволяет использовать выработанные в Москве принципы оценки карстовой опасности для Заречной части Нижнего Новгорода. При этом приняты следующие допущения:

- движение тектонических блоков относится к категории весьма малоамплитудных (не более 1-2 мм в год) и не сопоставимо со сроком службы сооружений (100 лет);

- влияние древних эрозионных врезов является косвенным признаком и указывает на возможность наличия древних карстовых полостей и мест разгрузки трещинно-карстовых вод, ведущих к усилению процессов выщелачивания и суффозионного разрушения заполнителя карстовых полостей;

- анализ и систематизации зон разуплотнения не проводились.

Известно, что образование карстового провала может происходить при градиенте вертикальной фильтрации более 3 (Кутепов В.М.). Для расчета использована формула :

$$J = \Delta H / M_r \quad (1)$$

где J – градиент вертикальной фильтрации воды в глинистой разделяющей толще,  $\Delta H$  – разница напора воды в перекрывающей песчаной толще и закарстованных породах, м,  $M_r$  – мощность слабопроницаемой глинистой толщи, м.

Высокие градиенты вертикальной нисходящей фильтрации (см. формулу (1)), изменяющиеся в пределах от 8 до 44, связаны с нарушением режима подземных вод. В остальных случаях градиент не превышает 3.

Для формирования провалов карстово-суффозионно-обвального и карстово-суффозионного типа (Хоменко В.П.) необходимо наличие полостей или сквозных каналов в глинистой покрывающей толще. Размеры карстовых полостей в татарских глинах в большинстве своем не превышает 0,5 м, то есть они относятся по классификации Соколова Д.С. к кавернам (Терминология карста, 1991). Размеры подземных карстопроявлений в растворимых породах изменяются от каверн (минимальный размер 0,1 м) до полостей размером более 0,5 м. Крупные полости встречаются не так часто и обычно представлены серией каверн, связанных между собой (суммарный размер достигает 10 м). Принята следующая градация размеров карстовых полостей: менее 0,5 м – каверна; более 0,5 м – полость.

Предложенные автором основные принципы районирования исследуемой территории по карстоопасности, учитывающие опыт исследований на территории Москвы, перечислены в таблице 3.

Таблица 3.

#### Принципы районирования Заречной части Нижнего Новгорода по карстовой опасности

Районы	Признаки
Опасный	Наличие в кровле карстующихся пород полостей, высотой более 0,5 м, заполненных водой или переотложенным материалом, а так же зон сильно-выщелоченных 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 м до 10 м. Градиент вертикальной фильтрации менее 3.
Неопасный	Наличие водоупора, перекрывающего растворимые породы, мощностью более 10 м.

#### 4.1. Построение карты районирования по карстовой опасности с применением ГИС

Выбор модели и метода решения. В качестве аналитической модели геологических объектов выбраны сплайн-функции (сплайны). Они обладают необходимой гибкостью, удобны в работе и сравнительно просты. Построить карту в таком случае значит, опираясь на результаты экспериментов, найти значение параметров модели. Метод группирования на классы основывается на научно-

обоснованных принципах районирования исследуемой территории по карстоопасности.

Определение принадлежности скважин и поверхностных карстопроявлений к зонам карстовой опасности. Группирование скважин на классы проводилось по результатам расчета признаков карстовой опасности в соответствии с данными, приведенными в табл. 2, по признаку бинарности (да, нет). В случае отсутствия хотя бы одного признака опасного района, скважина относилась к потенциально опасному району. Поверхностные проявления карста (воронки, озера) относились к опасной зоне. Все точки поверхностных и подземных проявлений карста были разделены на три класса, условно названные 1, 2, 3 (по уменьшению степени опасности). Карстовые воронки (провалы) и скважины позиционировались на карту путем геокодирования, при этом автоматически заполнялись семантические характеристики объекта (класс, мощность глин и далее).

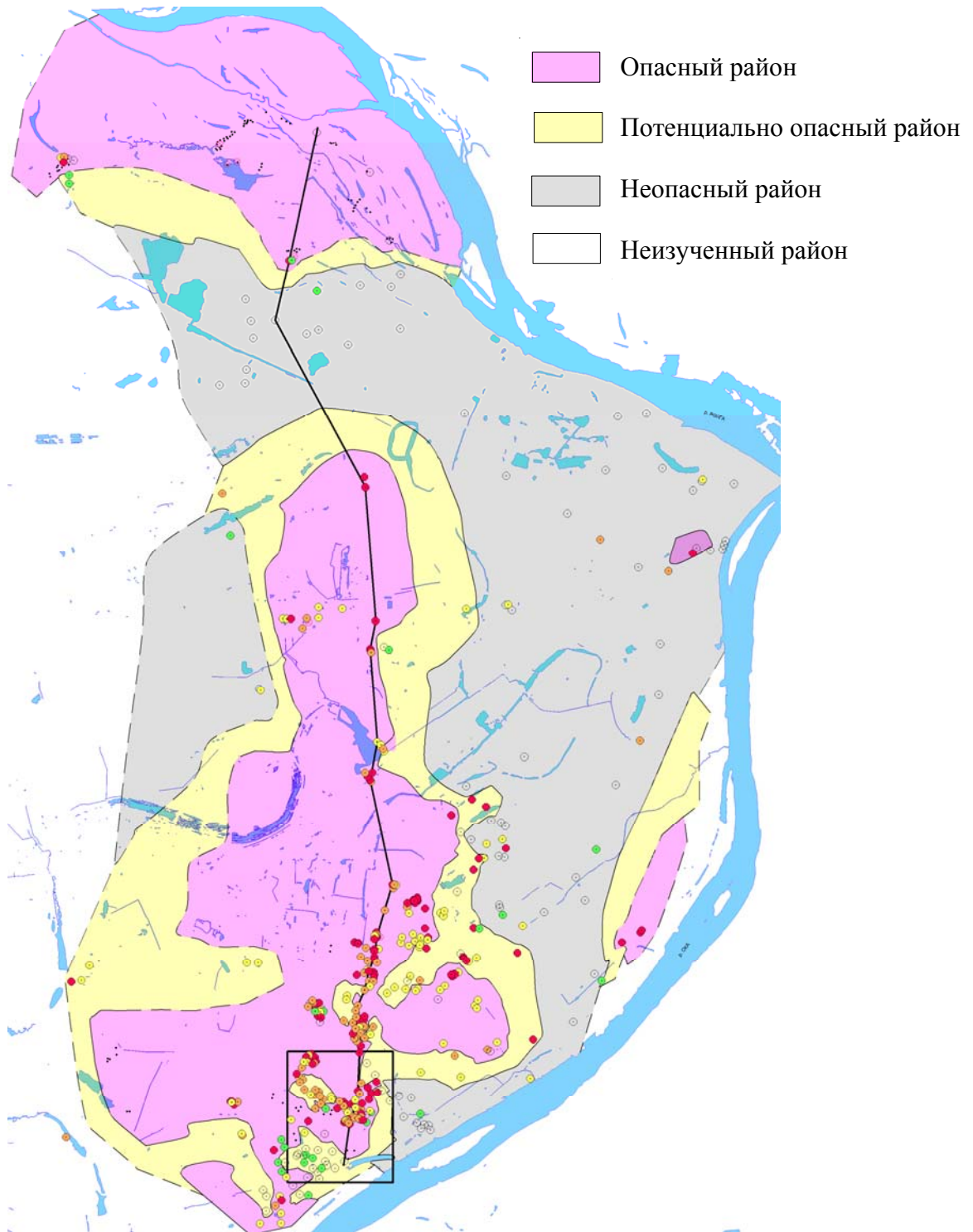
Выделение районов карстовой опасности. Возможность построения сложных поверхностей, заложенных в сплайнах, при небольшом (или неравномерном) числе точек наблюдений делают задачу неопределенной. Для того, чтобы задача имела единственное решение были введены граничные условия:

1. Линии должны иметь минимум кривизны.

2. Результатом построений должна быть карта, графически максимально приближенная к карте, построенной «вручную» (Ценева, 1993).

Для создания границ зон карстовой опасности использован модуль «построения изолиний по точечным объектам». В результате экспериментов наиболее эффективным оказался метод В-сплайн с коэффициентом сгущения 5. Более точно выделяются границы карстоопасных зон при шаге построения 0,75. Преобразовав линейные объекты в площадные, автор получил карту районирования по карстовой опасности (рис. 4).

Таким образом, территория Заречной части Нижнего Новгорода в зависимости от интенсивности проявления карстовых процессов подразделена на опасные, потенциально-опасные и неопасные для строительства инженерно-геологические районы. По условиям строительного освоения районы характеризуются следующим образом: 1) **опасные** – строительство сооружений I и II уровня ответственности возможно при обязательном проведении специальных изысканий и противокарстовой защиты; 2) **потенциально опасные** – обязательное проведение специальных изысканий для сооружений I и II уровня ответственности. Противокарстовая защита в зависимости от результатов изысканий и уровня ответственности; 3) **неопасные** – строительство большинства сооружений без ограничений. Строительство экологически опасных объектов, как правило, при условии проведения специальных изысканий (специальные изыскания проводятся в соответствии со СНиП 11-102-97 и СП 11-105-97).



**Рис. 4. Схематическая карта районирования Заречной части Нижнего Новгорода по карстовой опасности. Масштаб 1:25000.**

Градация скважин по цветам: прозрачный – не вскрывшая карстовые полости; красный – вскрывшая полости заполненные водой; оранжевый – вскрывшая полости, заполненные переотложенным материалом; желтый – вскрывшая разрушенные зоны; зеленый – вскрывшая зоны цементации, выветрелости, трещиноватости. Градация поверхностных карстопроявления по цветам: черный – карстовая воронка; красный – карстовый провал. Черным прямоугольником отмечен участок моделирования геологической среды.



Контроль качества и достоверность информации. Качество вводимой информации проверялось на этапе ввода в базу данных. Объективная оценка достоверности карты опирается на ряд четко сформулированных определений:

- «Для решения задачи X модель должна отвечать следующим критериям...».
- «Характеристика модели такова, что она позволяет решить задачу Y (или класс задач Y, Z, K)».

Первая группа определений является основой (правилами), которыми надо руководствоваться при построении модели. Такой основой являются выделенные и обоснованные условия и факторы карстообразования и принципы оценки карстовой опасности для территории Заречной части города.

Вторая группа определений является набором критериев для объективной оценки соответствия (пригодности) модели решаемой геологической задаче. Объективность оценки определяется составом и объемом исходных данных, которые в свою очередь определяются этапом инженерно-геологических работ. Для создания кондиционной карты (СП 11-105-97) необходимы 4 скважины на 1 км<sup>2</sup>. Для исследуемой территории характерна неравномерная изученность (от 1 до 13 тчк/км<sup>2</sup>), определяющая «схематичность» карты, и большинство границ проведено как «предполагаемые». Достоверность карты контролируется граничными условиями, определяющими единственность решения при данном количестве точек наблюдения.

Применение информационных технологий пространственно-временного прогноза для поиска эффективных решений в оценке устойчивости территории города к карстовым процессам позволяет не только получать одномоментный результат, пополнять данные, но и моделировать различные версии и решения.

Использованная технология построения электронной карты является одним из решений пространственного прогноза карстоопасности (рис. 5).



**Рис. 5. Технология построения информационной модели пространственного прогноза карстоопасности**

Сопоставление этих результатов с результатами ранее выполненных исследований аналогичной направленности позволили сделать следующие выводы:

1. Деление по категориям карстоопасности при недостаточности исходной информации является условным, не обеспечивающим стопроцентной достоверности, поэтому оно требует осторожного применения и дополнительных исследований.

2. Для актуализации карты-схемы районирования по карсту необходим постоянный карстовый мониторинг.

3. Сходимость информационной модели карстоопасности и карты, выполненной стандартным способом, достигает 90%.

4. Результаты построения карты подтверждают возможность применения принципов районирования по карстовой опасности, используемых в Москве, для территории Заречной части Нижнего Новгорода.

## Глава 5.

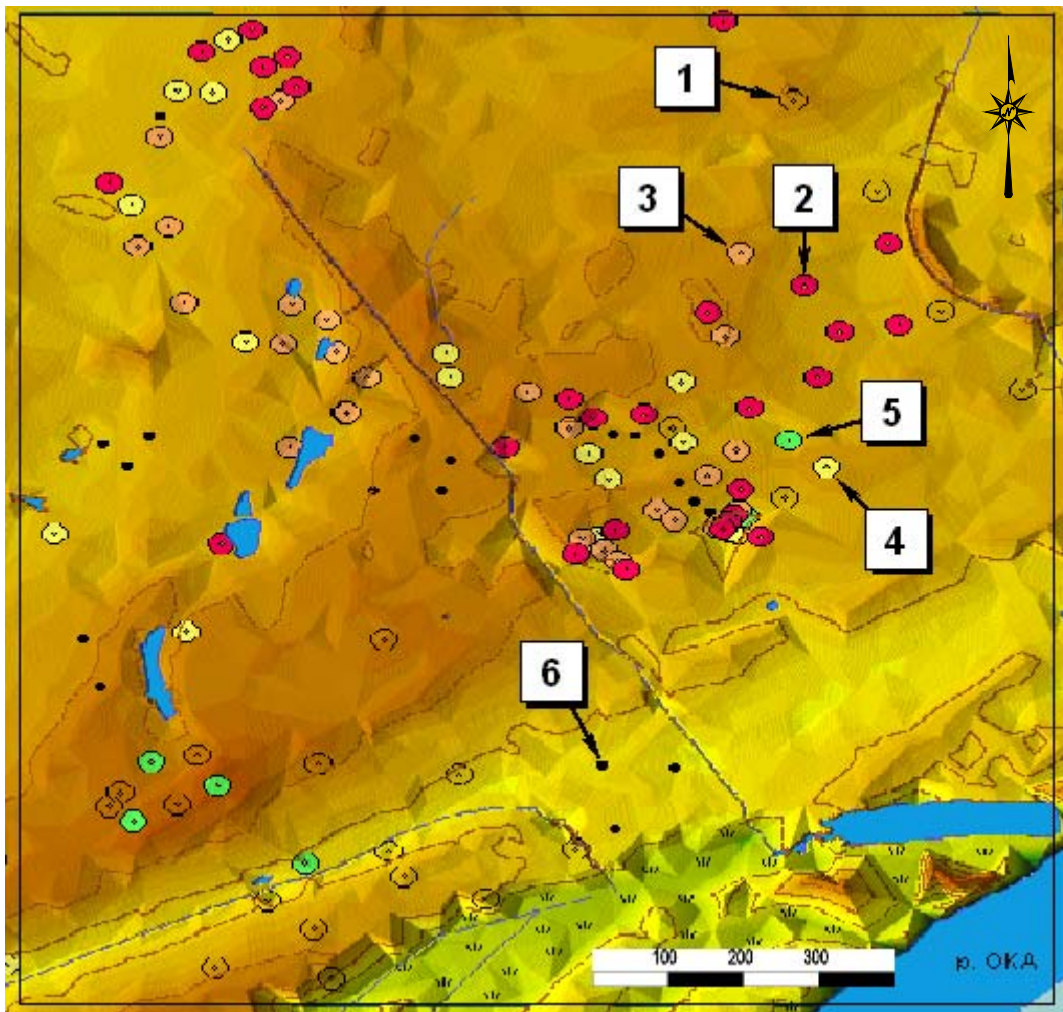
### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

#### 5.1 Создание цифровых карт природных факторов

Цифровые модели карт мощностей глинистых отложений ( $P_{2t_1}$ ) и глубин залегания кровли карстующихся пород ( $P_{2kz_1}$ ) масштаба 1:10000 для участка площадью 1 км<sup>2</sup>, расположенного в Автозаводском районе города, построены на основе созданных автором классификатора и базы данных скважин, вскрывших подземные проявления карста. Область исследования характеризуется интенсивным развитием покрытого карбонатно-сульфатного карста, сопровождающегося провалообразованием (рис. 6).

Трехмерная (3D) модель рельефа. Модель создана по результатам топографо-геодезических измерений с помощью программного приложения «Построение матрицы высот» (рис. 6). Метод построения поверхности основан на средневзвешенной интерполяции высотных точек со сглаживанием поверхности. Информация об абсолютных отметках земной поверхности, содержится в точечных, площадных и линейных объектах: «отметка высот», «озеро», «канал», «река».

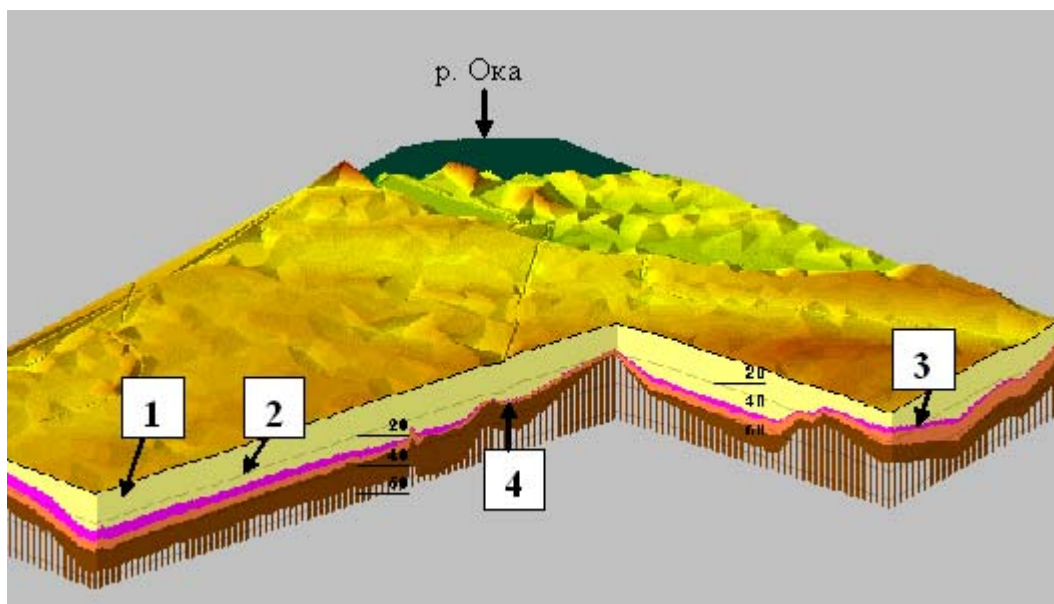
Карта фактического материала (КФМ). Позиционирование точечных объектов (скважина, карстовая воронка) на карту проводилось путем геокодирования по координатам X, Y, H, заданным в базе данных. Семантические характеристики точек наблюдения включали данные, необходимые для построения матрицы слоев (возраст, мощность, абсолютная отметка устья скважины). Карта фактического материала также представлена на рис. 6.



**Рис. 6. Матрица высот и карта фактического материала исследуемого карстоопасного участка, расположенного в Заречной части Нижнего Новгорода**

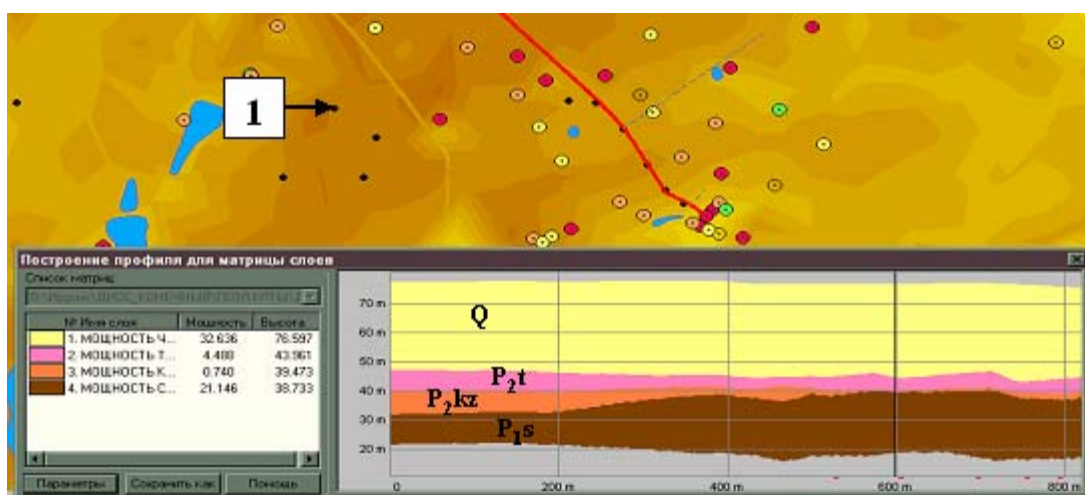
1 – скважина, не вскрывшая карстовых полостей или разрушенных зон; 2 – скважина, вскрывшая полость, заполненную водой; 3 – скважина, вскрывшая полость, заполненную переотложенным материалом; 4 – скважина, вскрывшая разрушенную зону; 5 – скважина, вскрывшая зону цементации, выветрелости, трещиноватости; 6 – карстовая воронка

3D модель отложений. Модель создана с применением модуля «Построение матрицы слоев» с учетом 3D модели рельефа. При интерполяции использовалась семантическая характеристика «мощность», сформирована легенда матрицы (геологические слои и последовательность их залегания в разрезе) и использована методика соответствия регулярного набора числовых значений элементов (мощностей слоев) его семантическому описанию (легенде) (Геоинформационная система..., 2005). Используя 3D модель слоев (рис. 7 и 8), геолог может визуально просмотреть и проанализировать геологические данные в любой точке закарстованного участка.



**Рис. 7. Матрица слоев карстоопасного участка, расположенного в Заречной части Нижнего Новгорода.**

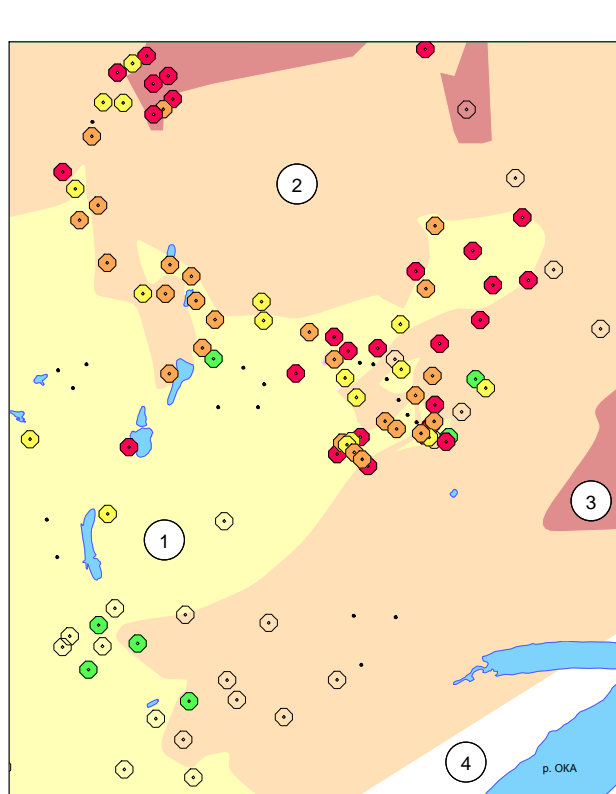
1 - четвертичные аллювиальные пески; 2 – глинистые отложения татарского яруса верхней перми; 3 – карбонатные отложения казанского яруса верхней перми; 4 – гипсово-ангидритовая толща сакмарского яруса нижней перми



**Рис. 8. Геологический разрез района карстового оврага в Автозаводском районе.**

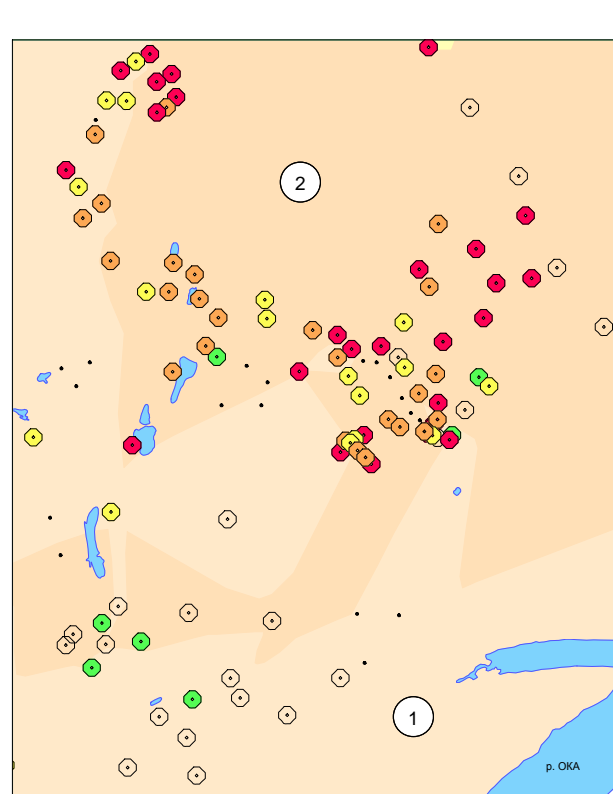
1 – карстовая воронка. Цепочка карстовых воронок приурочена к местам подъема кровли гипсово-ангидритовой толщи сакмарского яруса нижней перми. Глины татарского яруса верхней перми мощностью менее 5 м залегают на практически размываемых карбонатных отложениях казанского яруса верхней перми (мощность около 1 м).

Цифровые модели карт. Картирование мощностей глинистых отложений ( $P_2t_1$ ) и глубин залегания кровли карбонатных пород ( $P_2kz_1$ ) рассматривалось как задача отнесения элементарного участка площади к одной из возможных градаций данных параметров. Построение карт проводилось по 3D модели слоев с применением модуля «Построение зон соответствия по вычислениям». Используя диалоговое окно и задав условия построения, были созданы растры для каждой градации. Векторизованные по мозаике растров качества данные, сводились в карты мощностей глинистых отложений (рис. 9) и глубин залегания кровли карстующихся карбонатных отложений (рис. 10).



**Рис. 9. Карта мощностей глинистых отложений ( $P_2t_1$ )**

1 – мощность менее 5 м; 2 – мощность 5-10 м; 3 – мощность более 10 м; 4 – нет данных.



**Рис. 10. Карта глубин залегания кровли карбонатных отложений ( $P_2kz_1$ )**

1 – глубина кровля менее 35 м; 2 – глубина кровля более 35 м.

## **5.2. Количественная оценка влияния природных факторов на интенсивность карстового провалообразования.**

Задача решена методом теории качественных признаков, целесообразность использования которой связана с тем, что сам факт происхождения провала количественно не выражается, и исследуемые факторы могут быть охарак-

теризованы не только количественно, но и качественно (например, особенности геологического строения участка и т.п.).

Исходными данными являлись цифровые модели карт мощностей глинистых отложений (рис. 8) и глубин залегания кровли карбонатных пород (рис. 9) с нанесенными на них карстовыми воронками.

При количественной оценке влияния природных факторов на интенсивность карстовых провалов нужно было установить:

- наличием связи между данным фактором и происхождением провала;
- характер и силу этой связи.

Ввиду того, что образование карстового провала происходит под действием многочисленных природных факторов, влияние каждого из них проявляется в виде тенденции, которая количественно может быть выражена системой коэффициентов связи, имеющей применительно к поставленной задаче вид (Рекомендации..., ПНИИИС, 1982):

$$Q_i = \frac{n_i(A - A_i) - (n - n_i)A_i}{n_i(A - A_i) + (n - n_i)A_i}, \quad (2)$$

где  $A$  – общая площадь распространения данного фактора;  $A_i$  – площадь  $i$ -го признака фактора;  $n_i$  – количество карстовых провалов на площади  $A_i$ ;  $n$  – общее число локальных поверхностных карстопоявлений на площади  $A$ .

В результате расчетов получена таблица сопряженности (табл. 4).

**Таблица 4.**

**Оценка влияния природных факторов на интенсивность карстового провалообразования (участок в Автозаводском районе Заречной части города)**

Геологический фактор	$A_i$ , км <sup>2</sup>	$n_i$ , шт.	$Q_i$
Мощность глин над карстующимися породами, м: менее 5 от 5 до 10 более 10	2,18	14	0,63
	3,68	6	-0,54
	0,37	0	-1,00
Сумма	6,23	20	
Глубина залегания карстующихся пород: менее 35 более 35	3,11	10	0,05
	3,12	10	-0,05
	Сумма	6,23	20

Примечание – величина  $Q_i$  (см. формулу (2)) изменяется от -1 (провалы невозможны при  $i$ -м признаке исследуемого фактора) до +1 (провалы возможны только при  $i$ -м признаке).

Анализ характера изменения коэффициентов связи (см. табл. 4) показал:

1. При увеличении мощности глин, перекрывающих карстующиеся породы, существует тенденция к уменьшению интенсивности провалообразования и при мощности более 10 м образование провалов маловероятно. Это можно объяснить тем, что наличие глинистых водонепроницаемых отложений, перекрывающих карстующиеся породы, препятствует поступлению в них агрессивных подземных вод и одновременно затрудняет процесс гравитационного обрушения покрывающих пород за счет достаточно высокой прочности глин.

2. С увеличением глубины залегания карстующихся пород тенденция к снижению интенсивности образования провалов так же прослеживается. Очевидно, это связано с тем фактом, что чем глубже находится полость, тем шире она должна быть, чтобы над ней мог образоваться провал, а крупные полости встречаются намного реже мелких. Точнее влияние данного фактора на карстовое провалообразование можно будет оценить на больших площадях с более контрастным рельефом кровли карстующихся пород (на исследуемом участке глубина залегания карстующихся пород колеблется в интервале от 30 до 40 м).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предметом данного исследования являлась оценка карстовой опасности Заречной части Нижнего Новгорода с применением ГИС-технологий. Ему предшествовало определение основных условий и факторов, благоприятных для развития карста, создание электронного классификатора и баз данных по скважинам, пробуренным для изучения карста, сбор сведений о поверхностных карстопроявлениях. В основу исследований положены архивные материалы ОАО «НижегородГИСИЗ». Предложенная концептуальная модель районирования территории по карстоопасности синтезирует результаты изучения карста Заречной части города (Н.А. Ценева, Е.В. Копосов, А.А. Сафронова и др.), а также результаты исследований механизма карстового провалообразования, полученные В.П. Хоменко, В.В. Толмачевым, В.М. Кутеповым и другими авторами. Моделирование геологической среды использовано в качестве критерия проверки правильности представлений о влиянии природных факторов на провалообразование.

Основные результаты оценки карстовой опасности Заречной части города, проведенной автором лично (Соколова, 2006; 2007; 2008; 2009; 2010 (в печати)) и в соавторстве (Кириенко, Соколова, 2007; Соколова, Хоменко, Толмачев, Алешина, 2010) заключаются в следующем:

1. Разработана технологическая схема построения цифровой модели карты районирования по карстовой опасности на основе банка данных инженерно-

геологической информации. Обоснованы критерии оценки карстовой опасности, выбор аналитической модели и метода решения, проведена оценка качества информации и достоверности построенной карты.

2. По результатам построения карты карстовой опасности сделаны выводы о необходимости сопровождения таких работ постоянным карстовым мониторингом, о преимуществах использования ГИС-технологий по сравнению с «ручным» способом и о применимости методики для территории Нижнего Новгорода.

3. Создана технология построения карт мощностей и глубин залегания кровли геологических отложений на основе баз данных и 3D моделирования геологической среды, представляющей собой трехмерные модели рельефа и геологических слоев. Методика дает возможность получить геологическую информацию в любой точке 3D модели слоев для дальнейших научных обобщений.

4. По цифровым моделям карт проведена оценка степени и характера влияния мощности глин, перекрывающих растворимые породы, и глубин залегания кровли карбонатных отложений на интенсивность карстового провалообразования. Инженерно-геологические условия развития карста участка Автозаводского района типичны для Заречной части Нижнего Новгорода. Таким образом, на исследуемой территории образование провалов маловероятно при мощности глинистой толщи более 10 м; с увеличением глубины залегания кровли карстующихся пород существует тенденция к уменьшению интенсивности образования провалов.

В ходе дальнейших исследований предполагается добавить в электронный классификатор слои и объекты по тектоническим структурам, техногенным объектам, пунктам геофизических наблюдений; создать базы данных по поверхностным проявлениям карста, результатам мониторинга зданий и сооружений и далее. Основные методические приемы оценки карстовой опасности будут использованы при разработке специализированных ГИС-приложений в программном комплексе «Карта 2005». Опыт оценки карстовой опасности по данным электронного архива с использованием ГИС можно применить на других закарстованных территориях, что позволит оптимизировать их строительное освоение, снизить стоимость и сократить сроки инженерно-геологических изысканий.



**СПИСОК****работ, опубликованных по теме диссертации:**

1. **Соколова И.А. (2006):** Применение ГИС-технологий при районировании территории Нижнего Новгорода по степени опасности карстовых процессов // Инженерная Геология, 2006. № 2. С. 36-41.
2. **Соколова И.А. (2006):** Геолого-литологическая карта: современные методы построения // Инженерные изыскания в строительстве: Материалы научно-практической конференции молодых специалистов. М.: ПНИИИС, 2006. С. 46-48.
3. **Кириенко Л.А., Соколова И.А. (2007):** Концепция формирования банка пространственных геолого-топографических данных по результатам инженерно-строительных изысканий для принятия эффективных решений в градостроительной деятельности // Новые информационные технологии – инструмент повышения эффективности управления: Материалы VI межрегиональной научно-практической конф. Н. Новгород, 2007. С. 102.
4. **Кириенко Л.А., Соколова И.А., Демиденко А.Г. (2007):** Опыт применения ГИС «Карта 2005» в Нижегородском тресте инженерно-строительных изысканий // Инженерная геология, 2007. № 3. С. 78.
5. **Соколова И.А. (2008):** Методика структурирования данных для геоинформационного моделирования геологической среды // Геопрофи, 2007. №6. С. 14-18.
6. **Соколова И.А. (2008):** ГИС-моделирование закарстованных территорий // Пром. и гражд. стр-во, 2008. № 11. С. 14-16.
7. **Соколова И.А. (2009):** Автоматизированная система комплексной обработки инженерно-геологической информации // Инженерная геология, 2009. № 2. С. 70-71.
- 8\*. **Соколова И.А. (2010):** Опыт применения ГИС-технологий для оценки карстоопасности и моделирования геологической среды Заречной части Нижнего Новгорода // Известия Вузов: геология и разведка, 2010. (в печати).
- 9\*. **Соколова И.А., Хоменко В.П., Толмачев В.В., Алешина Л.А. (2010):** Зарубежный опыт использования ГИС-технологий для оценки карстовой опасности // Инженерные изыскания, 2010. № 5. С. 18-22.

Примечание: статьи, номера которых отмечены знаком «\*», опубликованы в журналах, рекомендуемых ВАК.