

На правах рукописи



Покровский Виталий Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДТОПЛЕНИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОМСКА)**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск–2015

**Работа выполнена** в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент  
**Кузеванов Константин Иванович**

**Официальные оппоненты:**

**Гаев Аркадий Яковлевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», профессор кафедры геологии

**Трифонов Николай Сергеевич**, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, старший научный сотрудник

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

**Защита состоится** «25» декабря 2015 г. в 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета ДМ212.269.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, ауд. 504

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

(634050, г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте:

<http://portal.tpu.ru/council/2799/worklist>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
ДМ212.269.03



О.Е. Лепокурова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Строительное освоение урбанизированных территорий коренным образом изменяет геологическую среду и особенно – наиболее динамичную ее составляющую – подземную гидросферу. В этой связи, проблемы исследования гидрогеологических условий и, в частности, подтопления застраиваемых территорий является актуальной. Большинство исследователей, подтопление застроенных территорий понимается как комплексный гидрогеологический и инженерно-геологический процесс, при котором в результате нарушения водного режима и баланса территории происходит направленное повышение уровня подземных вод, нарушающее необходимые условия строительства или эксплуатации отдельных сооружений и требующее применения защитных мероприятий.

Подтопление, вызванное различными причинами, отмечалось во многих городах мира. В России подтапливаются многие населенные пункты в европейской части, на Урале, Дальнем Востоке, Сибири. Город Томск не является исключением в этом отношении.

В Томске (рис. 1) достаточно широко развиты процессы техногенного подтопления, вызывающего сложности в эксплуатации подземных коммуникаций и резко ухудшающего экологическую обстановку, известны и такие объекты, где техногенное изменение гидрогеологических условий приводит к возникновению чрезвычайных ситуаций. Наиболее яркими примерами являются оползневой склон Лагерного сада и микрорайон «Солнечный».

Общие проблемы подтопления застраиваемых территорий, методические приемы прогнозирования, вопросы теории и практики защиты от подтопления в промышленном и городском строительстве рассматривались в работах С.Е. Абрамова, М.Т. Адикова, В.Е. Ампилова, Б.Л. Горловского, Б.М. Дегтярева, Е.С. Дзекцера, В.И. Сологаева, В.С. Зильберга, Н.П. Куранова, Я.С. Садыкова, А.Ж. Муфтахова, Л.З. Шефердинова, О.В. Слинко, Р.А. Смирнова, и др.

Для территории Томска эти проблемы рассматривались сотрудниками ТПУ, ТКГРЭ ТГАСУ, ОАО «ТомскТИСИЗ», Института проблем ЖКХ, ОАО «Томгипротранс», АО «Томскгеомониторинг», Д.С. Покровским, К.И. Кузевановым, Л.А. Рождественской, Н.В. Крепша, О.В. Шмачковым, В.К. Поповым, В.А. Коробкиным, В.Е. Ольховатенко, Г.М. Роговым,

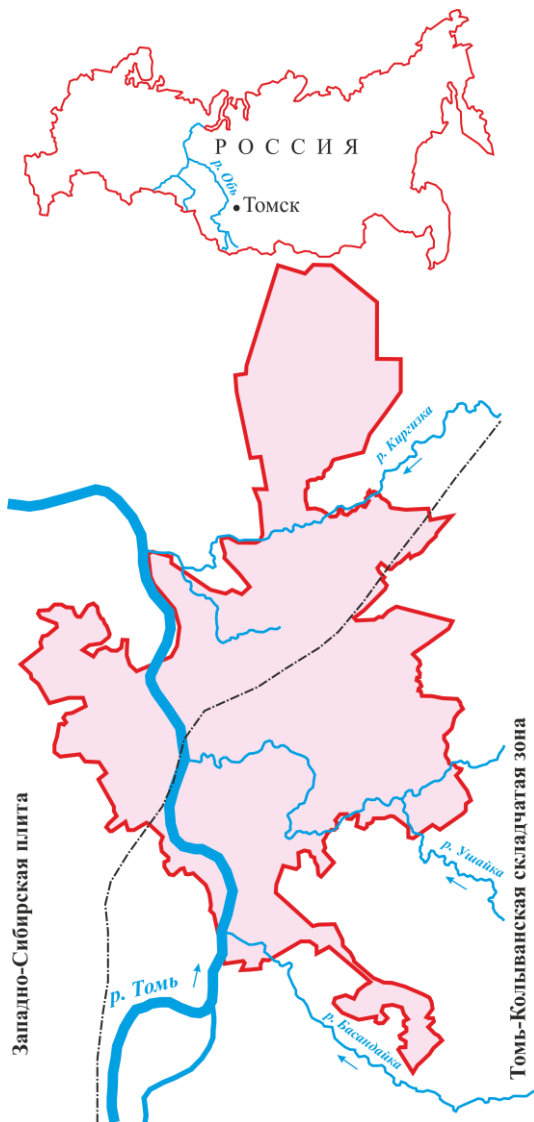


Рис. 1. Обзорная карта города Томска

Г.Г. Щербаком, М.Г. Рутманом, В.М. Лазаревым, С.В. Серяковым и др.

Получены достаточно обширные материалы, характеризующие геологические и гидрогеологические условия городской территории, однако многие вопросы, связанные с прогнозом эволюции подземной гидросферы города, остаются открытыми. Появившиеся средства современных ГИС-технологий и методов геофильтрационного моделирования позволяют продвинуть исследования в этом направлении.

**Целью работы** является разработка концепции и создание информационно-поисковой системы для оперативного прогноза степени потенциальной подтопляемости урбанизированных территорий на основе использования современных ГИС-технологий и методов геофильтрационного моделирования.

**Задачи исследований:**

1. Актуализировать материалы ранее проведенных исследований и построить электронные карты специализированной гидрогеологической информации с использованием средств ГИС–технологий;
2. Разработать методику картографических построений и оценки дренированности территории с использованием цифровых моделей рельефа;
3. Выявить роль и взаимосвязь факторов подтопления и определить их количественные экспертные оценки;
4. Разработать структуру информационной системы для оперативного прогноза степени потенциальной подтопляемости урбанизированных территорий;
5. Создать концепцию вложенных гидродинамических моделей территории города Томска, для оценки изменения уровня режима подземных вод на участках интенсивной техногенной нагрузки, и управления подземной гидросферой.

**Исходные материалы и методика исследований.** В основу работы положены фактические материалы, собранные в ходе исследований, проводимых сотрудниками ТПУ, Института ЖКХ в районах Севера, Сибири и Дальнего Востока, ОАО «ТомскГИСИЗ», ТГАСУ, ОАО «Томгипротранс», АО «Томскгеомониторинг», материалы натурных исследований автора, проводившиеся для уточнения закономерностей и эволюции процессов подтопления на отдельных участках города.

Исследование проводилось на базе теоретических представлений о механизмах развития процессов подтопления, изучения естественно-природных и техногенных факторов их формирования, компьютерных технологий анализа пространственно-временных изменений параметров геологической среды и взаимообусловленности разнонаправленных процессов. Использован широкий спектр необходимых методических приемов, начиная с комплексного анализа и актуализации материалов, проведенных ранее инженерных изысканий, статистического анализа и натурального обследования, и кончая построениями картографических моделей с применением современных ГИС-технологий и геофильтрационного моделирования.

Для обработки, анализа и интерпретации пространственных параметров задействованы программные комплексы *MapInfo*, *ArcView 3.2a*, *ArcGIS 9*. Для статистического анализа использовались возможности *Microsoft Excel*. Геофильтрационное моделирование осуществлялось средствами программных комплексов *GMS* и *FEFLOW*, *PMWIN*.

**Научная новизна работы.** Разработана методика картографических построений и оценки дренированности территорий с использованием цифровых моделей рельефа. Впервые для Томска получены электронные карты специализированной гидрогеологической информации, позволяющие производить комплексный анализ закономерностей процессов подтопления территории. Проведен анализ и обоснование параметров количественной оценки ведущих факторов подтопления. Создана рабочая версия информационно-поисковой системы для оперативного прогноза степени потенциальной подтопляемости участков городской территории, содержащая элементы геофилтрационного моделирования.

### **Основные защищаемые положения**

1. Природные и техногенные факторы подтопления, среди которых выделено ведущее значение строения верхней части геологического разреза, естественной дренированности территории и характера ее изменения под воздействием инженерного освоения, интенсивности дополнительного инфильтрационного питания подземных вод, поддаются анализу и функциональному описанию через экспертные количественные оценки.

2. Информационно-поисковая система, базирующаяся на основе электронного представления картографических материалов гидрогеологического содержания, позволяет оперативно производить оценку степени потенциальной подтопляемости отдельных участков городской застройки, что обеспечивается расширением доступности узкоспециальных гидрогеологических материалов за счет применения эффективного алгоритма предварительной обработки информации, представления в виде, удобном для принятия управленческих решений, открытым пользовательским интерфейсом для пополнения базы данных.

3. Трехуровневые гидродинамические модели территории города Томска, позволяют прогнозировать изменения режима подземных вод на участках интенсивной техногенной нагрузки и оптимизировать управление подземной гидросферой в масштабах города, кварталов районной планировки и локальных участков.

### **Достоверность защищаемых положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность результатов и защищаемых положений, выводов и рекомендаций обеспечена анализом широкого круга научных работ по теме диссертации, использованием современных теоретических представлений о механизмах развития процессов подтопления, современных апробированных методов и методик ГИС-технологий и геофилтрационного моделирования, проверкой разработок натурными обследованиями, публикацией и апробацией основных выводов и рекомендаций.

### **Практическая значимость работы.** Внедрение предложенной технологии

оценки степени потенциальной подтопляемости может быть использовано для:

1. Контроля и оперативного управления состоянием геологической среды;
2. Оценки вероятности возникновения, масштабов и интенсивности нежелательных последствий антропогенного воздействия;
3. Обоснования управленческих и инженерных решений обеспечения комфортной экологически безопасной обстановки, принимаемых на различных уровнях, от

разработки генерального плана до природоохранных мероприятий на конкретных участках городской территории;

4. Оценки стоимости земель городской территории;

5. Оптимизации планирования выделения финансовых средств для проведения реставрационных работ в исторически значимой части г. Томска.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на Международных конференциях студентов и молодых учёных имени М.А. Усова (Томск, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015), 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies In Geology, Exploration and Mining (Albena, Bulgaria, 2014), Международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий. Экологический катализ» (Новосибирск, 2006), XI Всероссийской студенческой научной конференции «Экология и проблемы охраны окружающей среды» (Красноярск, 2004), Международной форуме-конкурсе «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2012), школе-семинаре «Металлогения магматических и метаморфических комплексов: оценка и прогноз продуктивности» (Томск, 2007), Всероссийской геологической молодежной школе «Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от В.А. Обручева, М.А. Усова, Н.Н. Урванцева до наших дней» (Томск, 2013).

Результаты исследований были использованы при выполнении работ в рамках проекта № 07-05-13565 офи\_ц, гранта «Разработке информационно-поисковой системы для оценки характера и степени техногенного подтопления архитектурных памятников города Томска с использованием средств ГИС-технологий» программы УМНИК (2007 г.), в проекте «Разработка информационно-поисковой системы для многоцелевой оценки характера и степени техногенного подтопления территории Томска с использованием средств ГИС-технологий» конкурса «Привлечение молодых специалистов в инновационную и производственную сферы».

Исследования, проводившиеся по данной тематике, в 2012 году были отмечены медалью РАН.

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 33 печатных работах, из них: 3 – в центральных изданиях, включённых в перечень ВАК, 2 – в изданиях SCOPUS, 28 – в научно-технических сборниках и материалах конференций.

**Личный вклад автора.** Автором осуществлены сбор, анализ и обработка фактического материала по объекту исследований. Проведен анализ и обработка данных с использованием ГИС-технологий выполнены картографические построения, интерпретированы результаты работы и сформулированы выводы. В работе использованы личные наблюдения автора при проведении полевых работ в разных районах города, выполнявшихся с целью выяснения причин осложнения условий эксплуатации сооружений в связи с деятельностью подземных вод.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературных источников составляет 173 наименований. Общий объем работы – 214 страниц, включая 100 рисунков и 12 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, защищаемые положения, практическая значимость работы.

В первой главе освещаются представления об изменении гидрогеологических условий и техногенном подтоплении урбанизированных территорий, характеризуются современные методы их исследования, в том числе методы ГИС-технологий и численного моделирования, рассматривается состояние гидрогеологической изученности территории г. Томска.

Во второй главе приведены краткие сведения о физико-географических, геологических, гидрогеологических условиях объекта исследований. Особое внимание уделяется характеристике основных водоносных горизонтов и комплексов, режима, условий питания и разгрузки, особенностям химического состава и минералообразующей способности подземных вод. Подчеркивается, что подземные воды комплекса четвертичных отложений подвержены существенным техногенным изменениям и оказывают наибольшее влияние на условия строительства.

В третьей главе показано, что степень развития процессов подтопления и потенциальной подтопляемости вновь осваиваемых территорий определяется суммарным воздействием естественных и искусственных (техногенных) факторов, важнейшими из которых являются строение геологического разреза в зоне влияния сооружений, интенсивность дополнительного, по отношению к естественным условиям, питания водоносных горизонтов, которое косвенно можно оценить по водопотреблению, отнесенному к единице застраиваемой площади, глубина залегания грунтовых вод и верховодки, а также дренированность территории застройки. В главе представлена характеристика подтопляемых территорий города Томска.

В четвертой главе рассмотрена методика картографических построений и оценки дренированности территорий. Показаны общие операции, выполняемые средствами ГИС над высотными данными, результатом которых являются карты эрозионной сети, плотности и глубины вреза эрозионной сети, уклонов дневной поверхности территории исследований, сопровождаемые их интегральной оценкой как параметра дренированности.

В пятой главе охарактеризована методика разработки информационно-поисковой системы, позволяющей оперативно производить анализ пространственно-временных изменений геологической среды и оценку характера и степени формирования процессов подтопления городской территории. Показаны гидрогеологические модели (трех уровней) городской территории.

Результаты работы могут быть востребованы ведомствами и службами для контроля и оперативного управления состоянием геологической среды, оценки вероятности возникновения, масштабов и интенсивности нежелательных последствий антропогенного воздействия, обоснования управленческих и инженерных решений по обеспечению комфортной экологически безопасной обстановки, оценки стоимости земель городской территории, и проч.

В заключении приведены основные выводы исследований.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю – доценту кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии ТПУ К.И. Кузеванову за научное руководство. Автор благодарит Е.М. Дутову, А.Н. Никитенкова, К.К. Кузеванова, А.Д. Назарова, Д.С. Покровского, В.К. Попова, Л.А. Строкову, С.Л. Шварцева, сотрудников ОАО «ТомскТИСИЗ» О.В. Шмачкова, А.В. Белькевича, ОАО «Томгипротранс»

Б.А. Кикаса, С.В. Ястремского, АО «Томскгеомониторинг» В.А. Льготина, Б.А. Егорова, А.Л. Иванчуру, А.А. Балобаненко, О.А. Камневу, Н.В. Винниченко, Д.Н. Четвергова за помощь и консультации по вопросам, возникавшим в ходе выполнения работы.

## **ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

### **Первое защищаемое положение**

*Природные и техногенные факторы подтопления, среди которых выделено ведущее значение строения верхней части геологического разреза, естественной дренированности территории и характера ее изменения под воздействием инженерного освоения, интенсивности дополнительного инфильтрационного питания подземных вод, поддаются анализу и функциональному описанию через экспертные количественные оценки.*

Подтопление - комплексный многофакторный природно-техногенный процесс, развивающийся в условиях нестабильного гидродинамического равновесия, обусловленного сочетанием взаимодействующих компонентов окружающей среды, контролирующих водный баланс территории

Среди природных и техногенных факторов наибольшее значение имеют геологическое строение, интенсивность дополнительного питания подземных вод и дренированность территории, характеризующая скорость и объем оттока гравитационных вод.

Геологическое строение городской территории с точки зрения возможности формирования процессов подтопления проработано по типам фильтрационного разреза, в основу выделения которых положено соотношение легко проницаемых слоев и слоев, которые могут рассматриваться в качестве относительных водоупоров (рис. 2). Выделены одно-, двух- и трехслойные типы разрезов, среди которых наиболее склонны к формированию верховодки и процессов подтопления двух- и трехслойные разрезы Ф-II-I и Ф-III-I, представленные грунтами с высокими фильтрационными свойствами мощностью от 2 до 10 – 12 м, подстилающимися слабопроницаемыми и водоупорными породами. Карта районирования по типу фильтрационных разрезов оцифрована в программном комплексе ArcGis (рис. 2). Различные типы фильтрационных разрезов выделены полигональными объектами. Площадь участков, на которых нарушение водного баланса при техногенном воздействии приводит к формированию верховодки и развитию процессов подтопления, составляет до 55% городской территории.

Понятие дренированности как характеристика, отражающая совокупность условий, определяющих скорость и объемы оттока поверхностных и подземных вод с той или иной территории, является одним из ведущих показателей, определяющих необходимость проведения и объемы специализированных дорогостоящих изыскательских работ при изучении процессов подтопления.

Вместе с тем, четких методических указаний по непосредственной оценке степени дренированности территорий нет. Для получения ее количественной характеристики, нами предложено использовать набор показателей цифровой модели рельефа (ЦМР), обуславливающих степень дренированности, и определять их величины и значимость в системе балльных экспертных оценок.



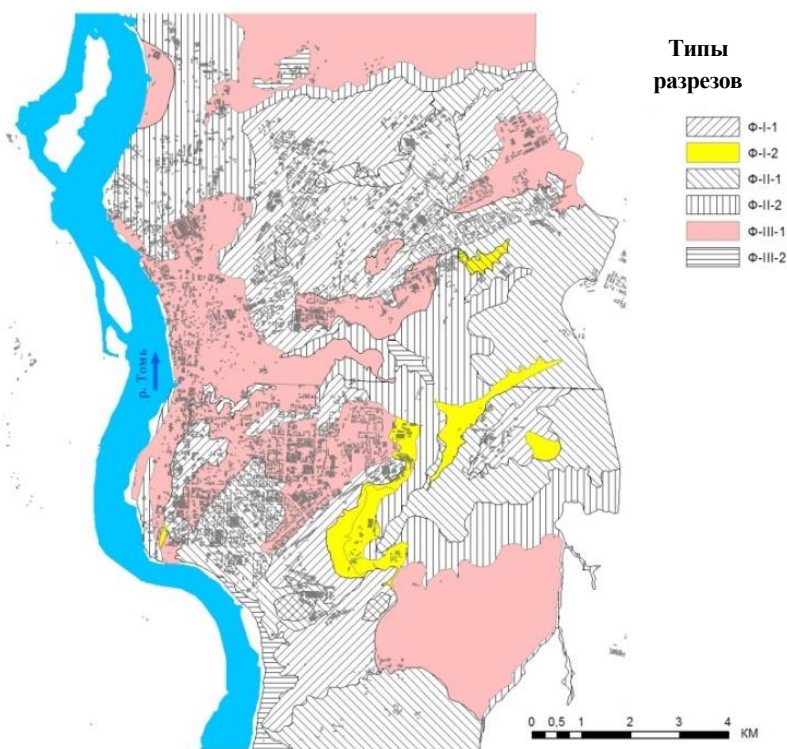


Рис. 2. Карта районирования по типу фильтрационных разрезов

Общую схему создания цифровых карт рельефа можно условно разделить на три этапа. На первом этапе осуществляются преобразования оцифрованных изолиний топографических карт в точечные объекты, получение единой сетки высот, что обеспечивает создание цифровой модели рельефа. Результатирующей процедурой является передача полученной ЦМР в ГИС. Обработка данных созданной ЦМР производится на втором этапе исследований. После выполнения процедуры ликвидации бессточных понижений рельефа средствами инструмента «*fill sinks*», которые могут рассматриваться

как объекты накопления поверхностных и транзита подземных вод, на основе выровненной ЦМР определяются уклоны дневной поверхности и направление стока в пределах каждой элементарной ячейки (инструмент «*flow direction*», метод определения направления потока – «*steepest slope*»). Для каждой элементарной ячейки ЦМР производится расчет кумулятивных значений стока, поступающего в оцениваемую ячейку под действием сил гравитации, т.е. фактически характеризующего площадь водосбора. Данная операция реализуется инструментом «*flow accumulation*». На третьем, заключительном, этапе производится построение карт плотности и глубины вреза эрозионной сети, уклонов дневной поверхности и результирующей карты, содержащей интегрированную информацию.

Построение карты эрозионной сети осуществляется путем вычитания из матрицы кумулятивных значений стока всех значений, имеющих величину ниже заданного порогового предела, формируемого путём суммирования элементарных ячеек водосбора, сток с которых попадает в оцениваемую ячейку. Пороговое значение выбирается, исходя из представлений о том, при какой минимальной площади водосбора образуются поверхностные водотоки с устойчивым в течение всего года стоком. Затем выполняется идентификация отдельных водотоков на основе данных по точкам слияниям и их векторизация. Для выполнения этих операций использовался инструмент «*drainage network extraction*».

Карта уклонов дневной поверхности строится с использованием инструмента «*slope*», работа которого в целом аналогична работе инструмента «*flow direction*». В качестве величины уклона оцениваемой ячейки принимается наибольшее значение между её центром и центрами соседних ячеек.

Для оценки плотности эрозионной сети территория в пределах каждой элементарной ячейки равномерной квадратной сетки рассчитывалось отношение длины элементарных дрен к площади ячейки.

Карта глубины вреза эрозионной сети строится на основе статистического анализа рельефа в рамках сетки, принятой при оценке плотности эрозионной сети. Глубина вреза оценивается как разность между максимальными и минимальными отметками рельефа.

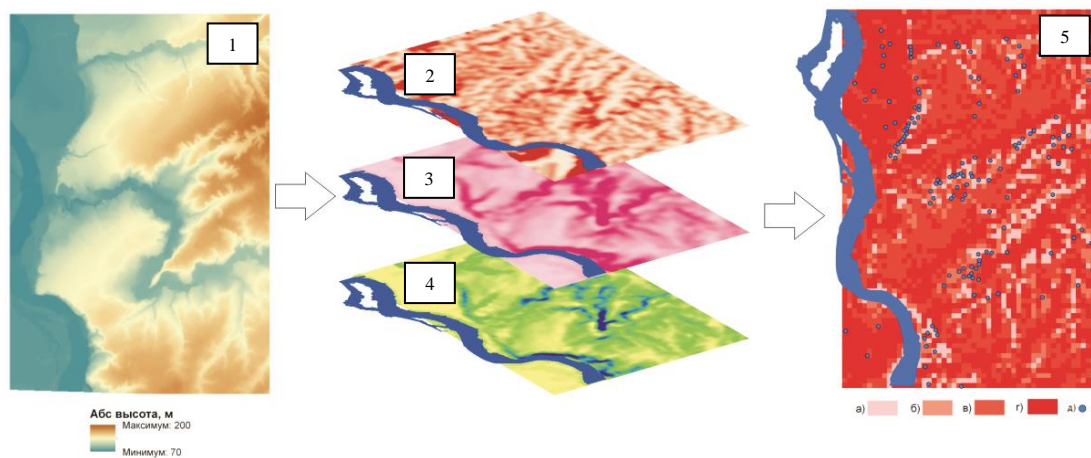


Рис. 3. Общая схема оценки дренированности территории города Томска:

1 - цифровая модель рельефа; 2 - карта плотности эрозионной сети; 3 - карта уклонов дневной поверхности; 4 - карта глубины эрозионного вреза; 5 - карта дренированности

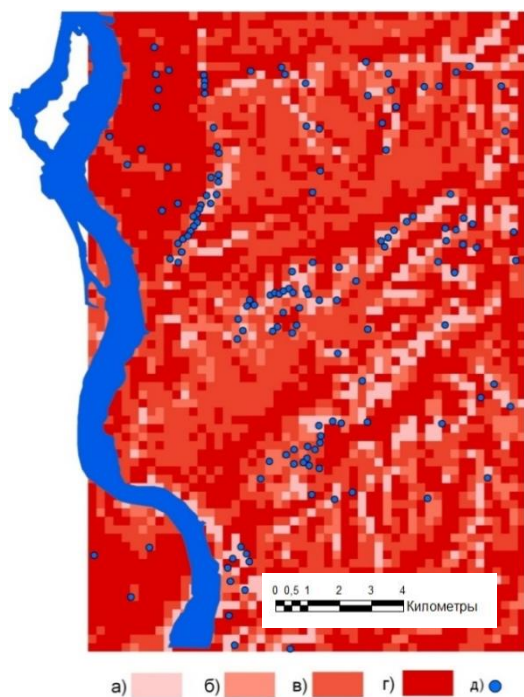


Рис. 4. Карта дренированности территории города Томска:

а - хорошо дренируемые; б - умеренно дренируемые; в - слабо дренируемые; г - не дренируемые; д - родники

Совокупность уклона поверхности, плотности и глубины вреза эрозионной сети нами использована в качестве комплексной оценки роли рельефа (рис. 3) и названа коэффициентом дренированности. Результирующая карта коэффициента дренированности территории, выраженного в системе балльных оценок, составлена с помощью функции «*field calculator*». Показанные на карте элементы соответствуют выделенным группам территорий: не дренируемые, слабо дренируемые, умеренно дренируемые, хорошо дренируемые (рис. 4).

Для подтверждения правильности предлагаемых подходов к оценке дренированности нами использованы результаты картирования родников. Конфигурация полученных полей градаций дренируемых территорий хорошо коррелирует с конфигурацией полей распространения родников, тщательно

задокументированных А.Д. Назаровым. Это свидетельствует о принципиальной правильности выбранных подходов к оценке дренированности.

Уровень залегания подземных вод можно использовать как индикатор развития процессов подтопления. Территория Томска преимущественно представлена

селитебной застройкой. Поэтому, учитывая отметки заложения фундаментов жилых зданий, нами были приняты четыре категории, характеризующие глубину залегания подземных вод: приповерхностное (0 – 2 м), неглубокое (2 – 5 м), среднее (5 – 10 м), глубокое (10 – 15 м).

В городе из водопроводно-канализационных сетей может теряться до 30 - 40% от подаваемого расхода, т.е. до 60 – 80 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Распределение потерь по площади можно считать пропорциональным водопотреблению, которое для Томска, практически не имеющего предприятий с резко повышенным использованием водных ресурсов, можно считать относительно равномерным. Для целей ранжирования дополнительного питания нами предложено разбить шкалу интенсивности водопотребления на четыре градации: менее 50; 50 - 100; 100 - 200; более 200 м<sup>3</sup>/сут на 1 га территории.

Наличие связи между интенсивностью развития подтопления и важнейшими факторами показывает, что каждый из них обладает относительной самостоятельностью и собственными особенностями воздействия на геологическую среду. Взаимодействие факторов дает начало цепи причинно-следственных явлений, которые приводят к развитию (или блокировке) процессов подтопления (табл. 1).

Таблица 1

Сводные показатели степени потенциальной подтопляемости

Степень потенциальной подтопляемости территории	Тип фильтрационного разреза	Дренированность, усл. ед.	Удельное водопотребление, м <sup>3</sup> /сут *га	Глубина залегания подземных вод, м
Неподтопляемая (развитие процессов подтопления маловероятно)	Ф-I-I	>30	50	10 - 15
Низкая (территории не склонны к развитию процессов подтопления и формирования верховодки)	Ф-I-2; Ф-II-2; Ф-III-2	20-30	50-100	5 – 10
Умеренная (развиваются процессы заболачивания и локальные зоны переувлажненных грунтов)	Ф-I-2; Ф-II-2; Ф-III-2	10-20	100-200	2 – 5
Высокая (формируются верховодка и процессы подтопления)	Ф-II-I; Ф-III-I	<10	>200	0 - 2

### **Второе защищаемое положение**

***Информационно-поисковая система, базирующаяся на основе электронного представления картографических материалов гидрогеологического содержания, позволяет оперативно производить оценку степени потенциальной подтопляемости отдельных участков городской застройки, что обеспечивается расширением доступности узкоспециальных гидрогеологических материалов за счет применения эффективного алгоритма предварительной обработки информации, представления в виде, удобном для принятия управленческих решений, открытым пользовательским интерфейсом для пополнения базы данных.***

Информационно-поисковая система базируется на анализе факторов, взаимосвязь которых позволяет определить степень потенциальной подтопляемости. При её работе происходит анализ разнородных электронных картографических материалов, отражающих дренированность территории, выраженную в условных единицах, глубину залегания подземных вод, типы фильтрационных разрезов, интенсивность дополнительного питания и проч.

Система содержит несколько относительно самостоятельных функциональных блоков, каждый из которых ориентирован на хранение, частичную обработку и передачу информации в рамках решения поставленных задач (рис. 5).

Каждый из факторов разбит на градации, что, по формальному признаку, позволяет использовать балльную систему оценки их комплексного воздействия (рис. 6). Однако, чисто формальный подход в данной ситуации неприемлем, т.к. факторы имеют различный удельный вес, а отсутствие или малое значение вклада некоторых из них (например, дополнительного инфильтрационного питания при неизменном уровне дренированности) может полностью исключить возможность подтопления. В связи с этим, система учета факторов дополнена логическими связями, учитывающими соподчиненность и возможный вклад отдельных из них. Например, однослойные разрезы Ф-I-I и Ф-I-II, представленные на карте принципиально разнородными грунтами, мы объединили в одну категорию, и участкам, попадающим в сферу влияния однослойных разрезов, автоматически присваивается низкая опасность развития процессов подтопления. Если же известно, что глубина залегания уровней подземных вод менее двух метров, то участок находится в зоне уже существующего подтопления. Имеются и другие допущения. В целом, учет логических связей, характеризующих степень потенциальной подтопляемости (низкая, умеренная, высокая, существующее подтопление), реализован через анализ суммарной балльной оценки ведущих факторов, к которым отнесены: глубина залегания подземных вод, дренированность территории, тип фильтрационного разреза и удельное водопотребление. Если сумма баллов более 10, степень подтопления оценивается как «низкая», «умеренная» соответствует интервалу от 7 до 10; «высокая» имеет пределы от 7 до 4; суммой менее 4-х баллов оцениваются участки «существующего подтопления».



Рис. 5. Структурная схема информационно-поисковой системы

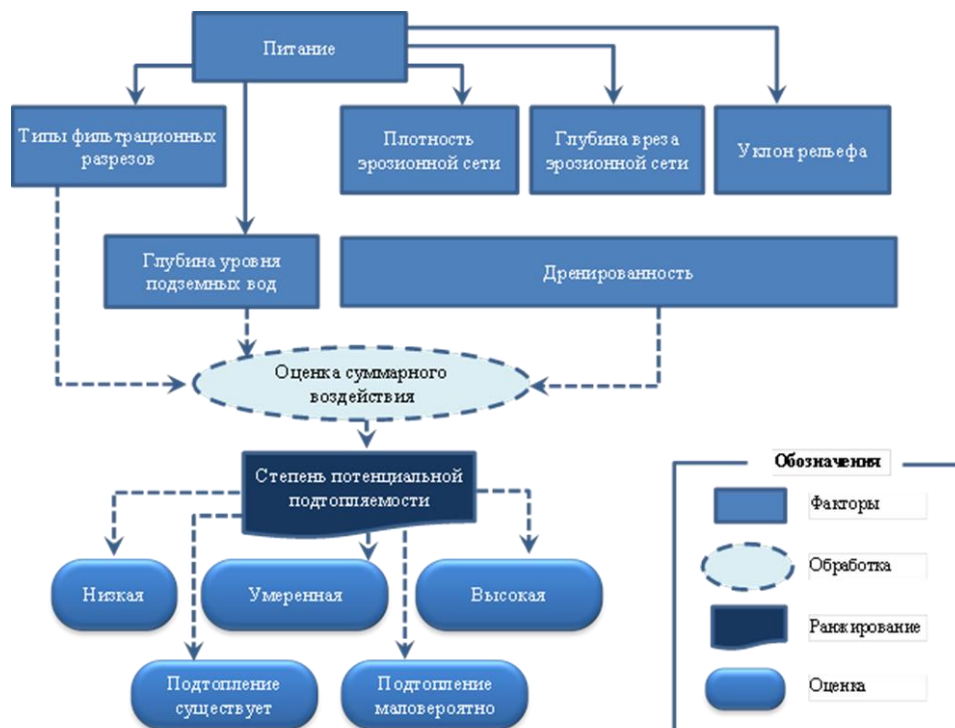


Рис. 6. Соподчиненность факторов, определяющих подтопление

Фактические данные, имеющиеся в составе информационно-поисковой системы, могут дополняться новыми сведениями, в соответствии с временными изменениями динамичных параметров многофакторной системы (уровни, удельное водопотребление и пр.). Допускается формирование разнообразных дополнительных поисковых условий, например, обычному пользователю интересно общее заключение о возможной опасности развития подтопления, тогда как специалиста-гидрогеолога может заинтересовать более подробная информация об исследуемом участке. Пользователю будет удобно находить любую интересующую его информацию, формируя поисковые условия и простым перемещением курсор по карте.

Выделение в составе информационно-поисковой системы функциональных блоков объясняется необходимостью использования разнородной исходной информации, требующей различных методов её обработки. Краткая их характеристика приведена в таблице 2.

Таблица 2

Функциональные блоки информационно-поисковой системы

Функциональный блок	Пример информационного наполнения	Методы обработки
Архивный картографический материал (на бумажных носителях)	Карта-схема удельного водопотребления	Сканирование, сшивка фрагментов, оцифровка с последующей координатной привязкой
	Гидроизогипсы техногенной верховодки	
	Гидроизогипсы грунтовых вод	
	Границы техногенной верховодки	
	Карта-схема типов фильтрационных разрезов	
Электронные базы данных	Геологические скважины	Согласование файловых форматов, согласование координатных систем, координатная привязка точечных объектов
	Гидрогеологические скважины	
	Родники	
	Памятники архитектуры	

Архивные электронные карты	Отметки и изолинии рельефа	Согласование координатных систем, координатная привязка графических примитивов
	Гидрографическая сеть	
	Границы застроенных территорий	
Иерархические гидродинамические модели	Модель города	Использование баз данных для разработки численных моделей. Включение результатов численного моделирования в состав синтетических карт ИПС
	Модель района	
	Модель строительной площадки	
Электронные карты информационно-поисковой системы	Карта уклонов дневной поверхности	Инструментальные средства геоинформационных систем
	Карта плотности эрозионной сети	
	Карта дренированности территории	
	Карта глубин залегания уровня подземных вод	
	Карта потенциальной подтопляемости территории	

Рабочая версия информационно-поисковой системы функционирует в среде геоинформационной системы *ArcGis*, обеспечивающей связь и взаимодействие с электронными базами данных не только для целей экспресс-оценки потенциальной подтопляемости территории, но для подготовки прогнозного моделирования.

### Третье защищаемое положение

*Трехуровневые гидродинамические модели территории города Томска, позволяют прогнозировать изменения режима подземных вод на участках интенсивной техногенной нагрузки и оптимизировать управление подземной гидросферой в масштабах города, кварталов районной планировки и локальных участков.*

Задачей модели **регионального ранга** является обобщённая оценка структуры и основных балансовых характеристик фильтрационных потоков, которые могут быть положены в основу районирования городской территории с учетом гидродинамических особенностей движения подземных вод и позволяют выделить локальные области питания, транзита и разгрузки подземных вод. В основу модели положен однослойный геологический разрез, где верхней границей является поверхность рельефа, а нижней – горизонтальная поверхность на уровне отметок главной дрены, русла р. Томи (рис. 7).

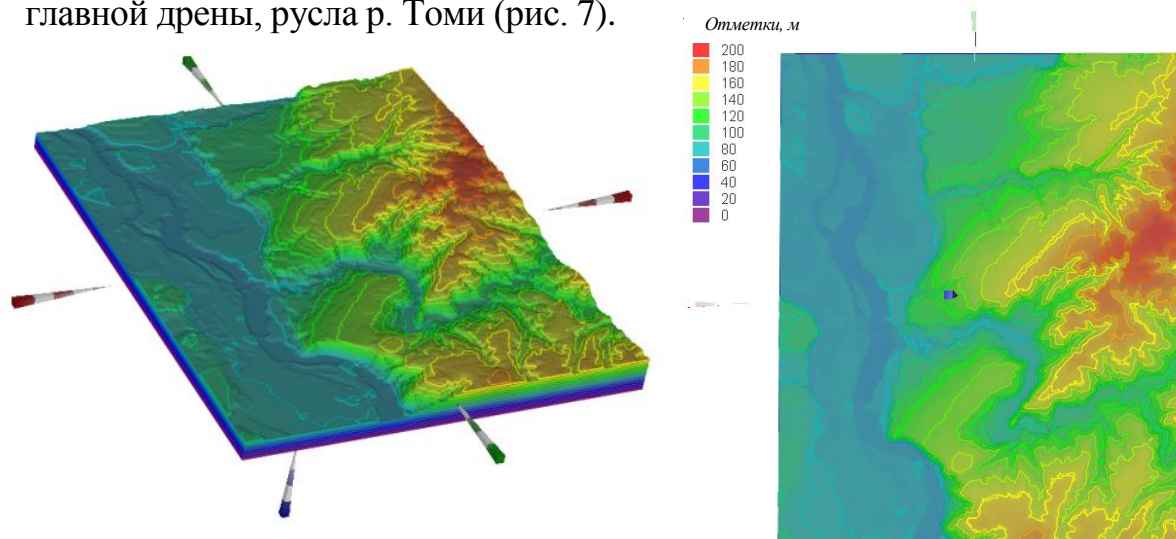


Рис. 7. Однослойная геологическая модель центральной части г. Томска

В результате моделирования установлены общие закономерности формирования структуры фильтрационных потоков и получена интегральная оценка величины инфильтрационного питания, поступающего на поверхность подземных вод, которая составила 150 мм/год.

Модели **районного ранга** создаются для прогноза изменения уровня режима подземных вод на участках интенсивного освоения городской территории, районов исторической застройки, подлежащих реконструкции или других социально значимых объектов. Примером такого прогноза является численное гидродинамическое моделирование для микрорайона Черемошники (рис. 8). Водовмещающая толща имеет трёхслойное строение: покровные суглинки, супеси, гравийно-галечные отложения, залегающие в основании геологического разреза. На этапе схематизации гидрогеологических условий установлены границы области фильтрации. Граница I рода представлена руслом р. Томи, граница II рода проходит по тыловому шву террасы. Боковыми границами области фильтрации являются линии тока разгружающегося со стороны Каштачной горы фильтрационного потока.

Результаты моделирования показали, что региональный поток подземных вод на протяжении значительного времени сохраняется без изменений. Направление фильтрационного потока контролирует основная естественная дрена, в качестве которой выступает русло р. Томи в западной части участка. В области развития водоносного горизонта подземные воды получают питание за счет инфильтрации атмосферных осадков, притока в восточной части участка за счёт разгрузки подземных вод транзитного потока и утечек из водонесущих коммуникаций. Слабые фильтрационные свойства горных пород верхней части гидрогеологического разреза в сочетании с дополнительным питанием и малыми гидравлическими уклонами создают благоприятные условия для развития процессов техногенного подтопления.

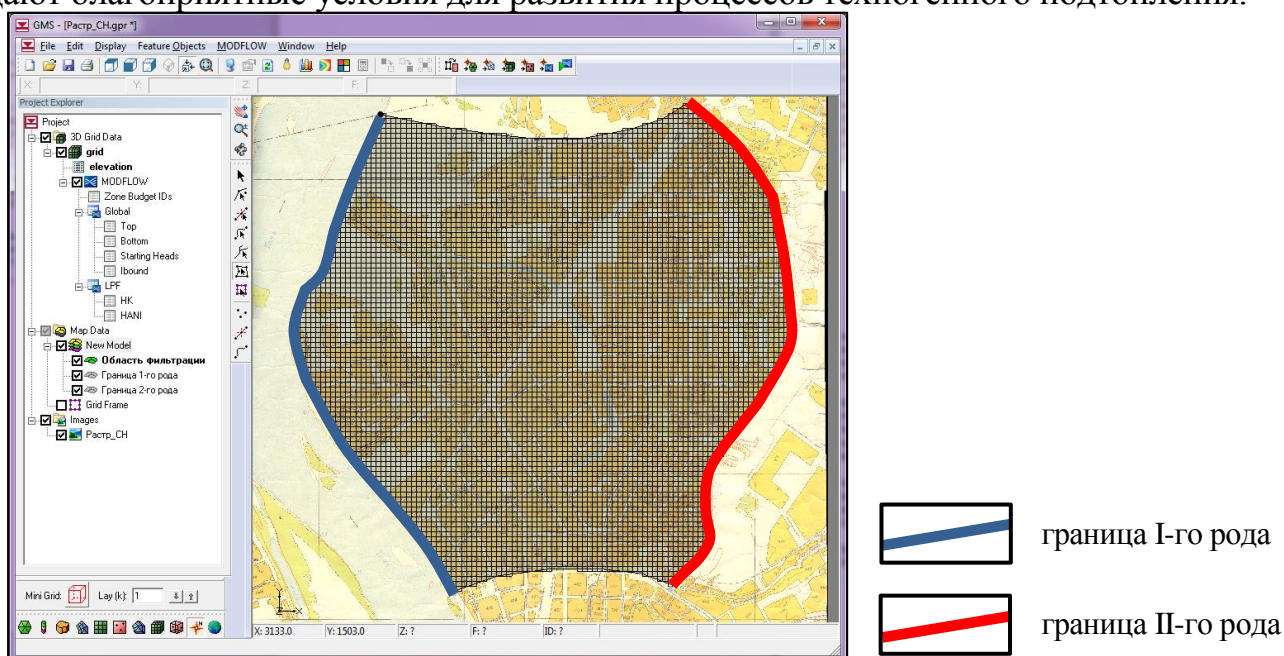


Рис. 8. Границы численной модели мкр. Черемошники

Моделирование показывает, что локальные участки подъема уровней подземных вод связаны с формированием неконтролируемых утечек, плохо поддающихся количественному учету.

Модели **локального ранга** использовались для исследования роли развития подтопления за счёт проявления барражного эффекта свайных оснований. Описание

простейших расчётных схем для аналитических решений известно по работам А.Ж. Муфтахова, которые нашли своё обобщение в пособии к СНиП по подтоплению. Для территории города прогноз влияния геометрического воздействия на структуру фильтрационных потоков приобретает особенное значение. Обзор освоенных участков городской территории в кварталах высокоэтажной современной застройки позволяет систематизировать форму свайных оснований в плане для целей количественной оценки барражного эффекта. По отношению к геометрическому воздействию на естественные фильтрационные потоки нами предлагается выделять следующие типы свайных оснований в плане:

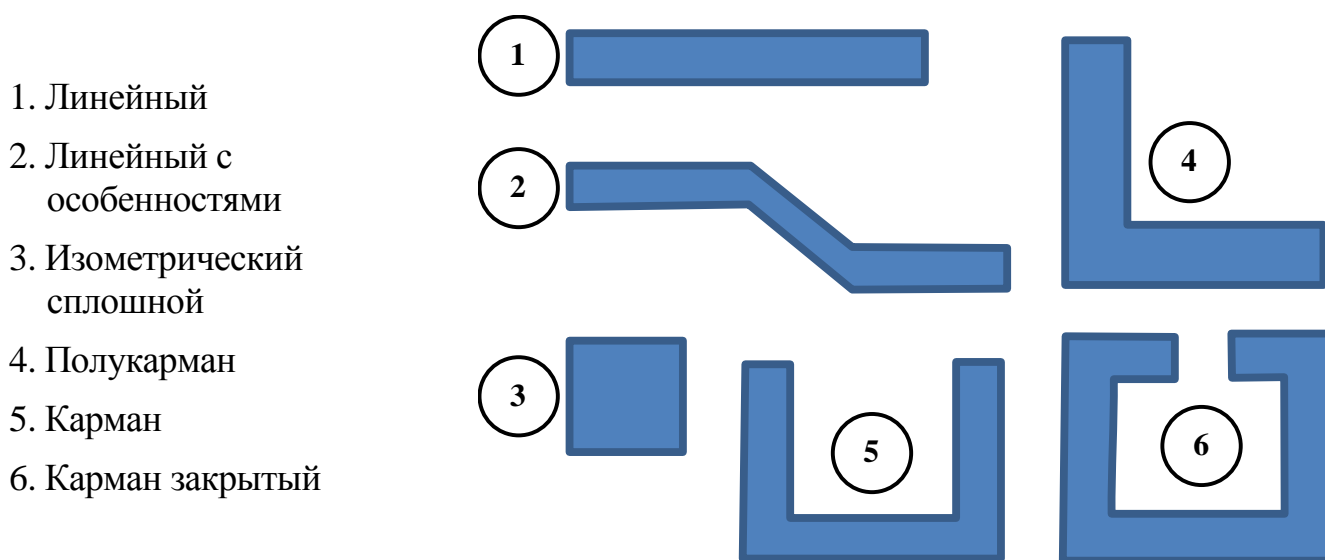


Рис. 9. Типы свайных оснований

При ограниченном наборе типовых форм свайных оснований в плане возникает целое семейство расчётных схем в случае различных ориентировок контура фундамента по отношению к направлению фильтрационного потока (рис. 9). Их многообразие возрастает при совместной внутриквартальной компоновке однотипных или разнотипных фундаментов.

Нами сделана попытка количественной оценки возможного роста уровней подземных вод за счёт проявления барражного эффекта свайных оснований. Поскольку подобное взаимодействие подземных вод с искусственной преградой предполагает искажение линий тока и формирование сложной формы фильтрационного потока, то для оценки изменения уровней целесообразно применять методы численного моделирования гидрогеологических условий.

Все локальные модели имеют трёхслойное строение до глубины 21 м по аналогии со строением типовых фильтрационных разрезов. Однако, в составе модели предусмотрено более дробное (пятислойное) деление верхнего водонасыщенного и полупроницаемого слоёв для возможности задания водонесущих коммуникаций на глубине 3 м и свай длиной 9 м. Результаты численного моделирования влияния различных по форме в плане типов свайных оснований отражены графически (некоторые результаты в качестве примеров показаны на рисунке 10 и в таблицах 3 - 4).

Для определённости модельное распределение гидроизогипс показано для второго слоя модели, который занимает положение над поверхностью отдельного полупроницаемого горизонта.



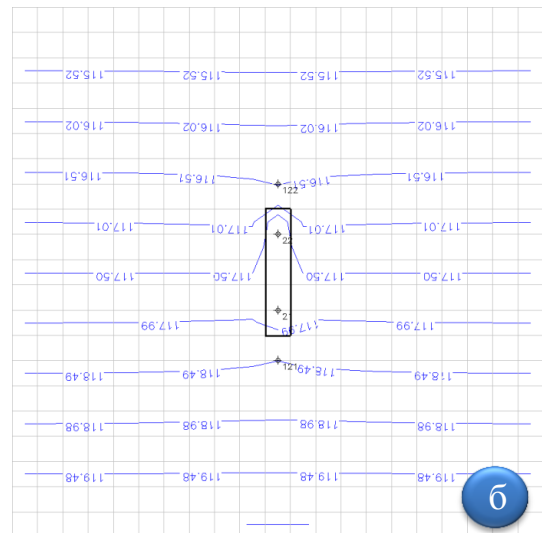
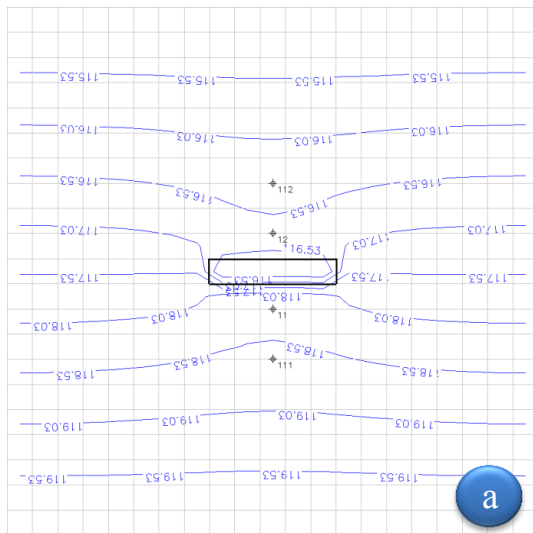
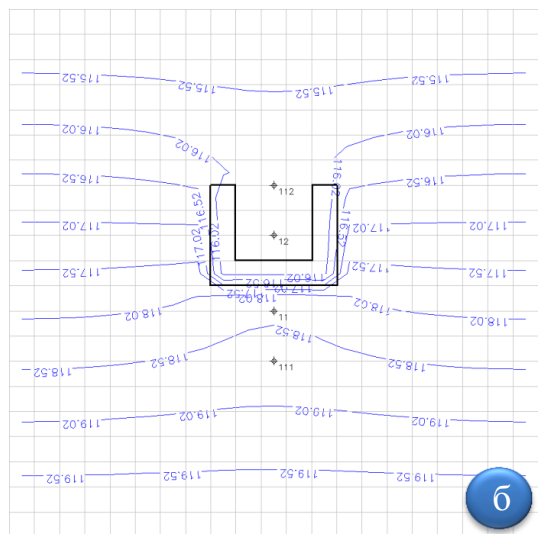
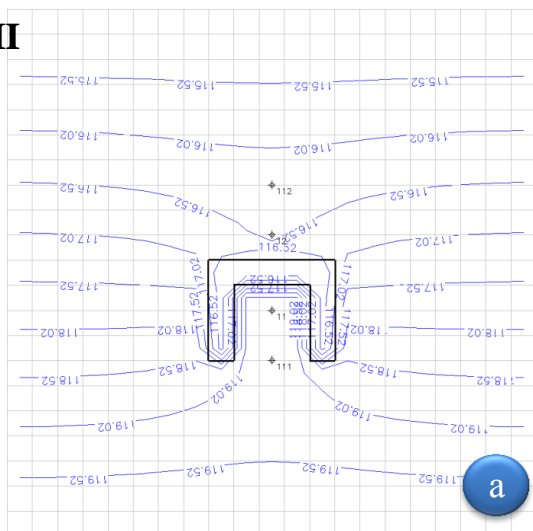
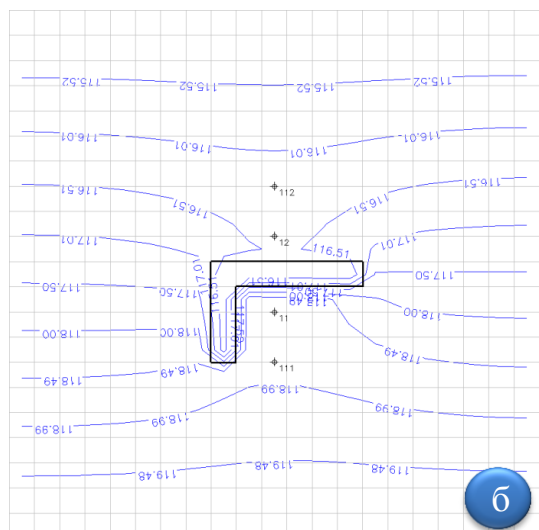
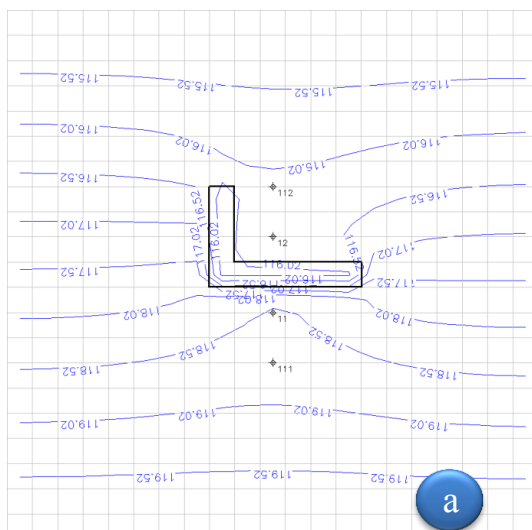
**I****II****III**

Рис. 12. Результаты моделирования воздействия свайных фундаментов на структуру фильтрационного потока:

I - линейный тип свайного фундамент (*a* – длинная сторона навстречу потоку; *б* – короткая сторона навстречу потоку); II - фундамент типа «карман» (*a* – выступы навстречу потоку; *б* – выступы по потоку); III - фундамент типа «полукарман» (*a* – выступ по потоку; *б* - выступ навстречу потоку)

**Разница модельных напоров (м) по наблюдательным скважинам в  
естественных и нарушенных условиях**

Слой	№ скв	Типы свайных фундаментов по форме в плане							
		«линейный»		«карман»		«полукарман»			
		Ширина по потоку	Длина по потоку	Выступы навстречу потоку	Выступы по потоку	Выступ по потоку	Выступ навстречу потоку	Вершина навстречу потоку	Вершина по потоку
1	11	0,53	-0,91	1,21	0,62	0,67	0,89	-0,07	1,33
	12	-0,53	-0,17	-0,62	-1,21	-0,89	-0,67	-1,13	-0,67
	111	0,28	0,13	0,72	0,36	0,39	0,54	0,48	0,85
	112	-0,28	-0,13	-0,36	-0,72	-0,54	-0,39	-0,69	-0,41
2	21	0,53	-1,75	1,20	0,62	0,67	0,89	-0,50	1,33
	22	-0,53	-1,18	-0,62	-1,20	-0,89	-0,67	-1,13	-0,73
	121	0,28	0,33	0,72	0,36	0,39	0,54	0,48	0,86
	122	-0,28	-0,33	-0,36	-0,72	-0,53	-0,39	-0,69	-0,45
3	31	0,23	0,33	0,50	0,28	0,30	0,39	0,29	0,44
	32	-0,32	0,70	-0,37	-0,76	-0,55	-0,40	-0,71	-0,39
	131	0,13	0,02	0,27	0,16	0,18	0,22	0,19	0,25
	132	-0,17	-0,15	-0,22	-0,48	-0,34	-0,24	-0,45	-0,24
4	41	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
	42	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
	141	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
	142	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01

Примечание: первая цифра в двухзначном и вторая цифра в трёхзначном номере скважины соответствует номеру модельного слоя; в пятом модельном слое изменения отсутствуют

Полученные результаты моделирования позволяют обоснованно судить о тех особенностях и различиях изменения гидрогеологических условий, которые сопровождают строительство зданий на разных типах свайных оснований.

В условиях трёхслойного фильтрационного гидрогеологического разреза, когда свайное поле по глубине не выходит за пределы полупроницаемого отдельного слоя, в нижнем водоносном горизонте изменений уровней подземных вод не происходит. Об этом свидетельствует отсутствие разницы напоров в условиях естественного и искусственных потоков по всем типам свайных фундаментов (скв. №№ 51, 52, 151, 152, табл. 3).

Особенностью проявления барражного эффекта является не только повышение изменение уровней подземных вод со стороны набегающего фильтрационного потока, но и одновременное падение уровней за непроницаемой преградой по сравнению с естественными условиями (табл. 4). Почти во всех рассмотренных случаях амплитуда таких изменений превышает величину одного метра, достигая максимума более двух метров.

Среди рассмотренных форм свайных фундаментов наиболее сильным воздействием на фильтрационный поток обладают типы «карман» и «полукарман», которые способны вызвать даже в проницаемых породах с коэффициентом фильтрации 3 м/сут рост уровня на 1,2 м и 1,3 м соответственно. Моделирование показывает, что только за счёт выбора оптимальной ориентировки свайного поля по отношению к направлению фильтрационного потока прогнозируемое повышение уровня можно снизить почти в два раза до 0,62 м и 0,67 м соответственно (табл. 4).

Амплитуда разрыва уровней подземных вод по разные стороны  
фильтрационной преграды

Слой	№ скв	Типы свайных фундаментов по форме в плане							
		«линейный»		«карман»		«полукарман»			
		Ширина по потоку	Длина по потоку	Выступы навстречу потоку	Выступы по потоку	Выступ по потоку	Выступ навстречу потоку	Вершина навстречу потоку	Вершина по потоку
2	21	0,53	-1,75	1,20	0,62	0,67	0,89	-0,50	1,33
	22	-0,53	-1,18	-0,62	-1,20	-0,89	-0,67	-1,13	-0,73
	121	0,28	0,33	0,72	0,36	0,39	0,54	0,48	0,86
	122	-0,28	-0,33	-0,36	-0,72	-0,53	-0,39	-0,69	-0,45
Амплитуда		1,06	0,66	1,82	1,82	1,56	1,56	1,61	2,06

Примечание: выделены ячейки, принятые в расчёт амплитуды с учётом особенностей формы свайного основания.

Опираясь на материалы моделирования, можно утверждать, что минимальным уровнем воздействия на структуру фильтрационного потока обладают такие фильтрационные преграды, ось которых в плане прямолинейна. Максимальный рост уровней подземных вод способны вызвать фильтрационные преграды с одним и двумя изменениями направления их продольной оси под углом в 90 градусов, образующими полузакрытую форму.

Полученные результаты дают только общее представление о возможностях прогноза изменения уровней подземных вод. Отметим, что учёт дополнительного питания может существенно изменить полученные оценки роста уровней подземных вод. Однако, приведённых примеров вполне достаточно для обоснования необходимости учета регионального направления фильтрационных потоков на всех этапах разработки проектов районной планировки городских кварталов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтопление формируется под действием природных и техногенных факторов, среди которых наибольшее значение имеют геологическое строение верхней части разреза, интенсивность дополнительного питания подземных вод, дренированность территории и ухудшение условий стока вод, влияние барражного эффекта свайных оснований инженерных сооружений. Степень подтопления территории поддается анализу и функциональному описанию через экспертные количественные оценки, определяющих ее факторов.

Созданная геоинформационная система, базирующаяся на основе электронного представления существующих карт г. Томска гидрогеологического содержания (районирования застроенной территории по типу фильтрационного геологического разреза, интенсивности дополнительного инфильтрационного питания, дренированности, уровня подземных вод) позволяет оперативно производить оценку степени потенциальной подтопляемости отдельных участков городской застройки. Эффективность использования предлагаемой системы обеспечивается расширением доступности гидрогеологических (узкоспециальных материалов) для практического использования широким кругом

заинтересованных лиц за счет применения эффективного алгоритма предварительной обработки большого объема специальной информации и представления её в удобном для принятия управленческого решения виде.

Гидрогеологические модели городской территории (на примере объекта мкр. Черемошники) для прогноза изменения уровня режима подземных вод на участках интенсивной техногенной нагрузки могут актуализировать и электронный слой уровня подземных вод геоинформационной системы.

Результаты исследований могут использоваться при инженерно-геологических изысканиях и быть востребованы различными ведомствами и службами, обеспечивающими жизнедеятельность города, для:

- оптимизации проектов инженерно-геологических изысканий;
- контроля и оперативного управления состоянием геологической среды;
- оценки вероятности возникновения, масштабов и интенсивности нежелательных последствий антропогенного воздействия;
- обоснования управленческих и инженерных решений для обеспечения комфортной экологически безопасной обстановки, принимаемых на различных уровнях, от разработки генерального плана до природоохранных мероприятий на конкретных участках городской территории;
- оценки стоимости земель городской территории;
- оптимизации планирования выделения финансовых средств при проведении реставрационных работ в исторически значимой части г. Томска.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах рекомендованных ВАК:**

1. Покровский, В.Д. Информационно-поисковая система оценки степени подтопляемости территории города Томска / В.Д. Покровский, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов, Д.С. Покровский // Вестник ТГАСУ No 1, - 2015 - С. 172 - 181.
2. Покровский, В.Д. Методические подходы к оценке степени дренированности урбанизированных территорий / В.Д. Покровский, Е.М. Дутова, А.Н. Никитенков, К.И. Кузеванов, Д.С. Покровский // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 1; URL: <http://www.science-education.ru/125-20130>.
3. Покровский, Д.С. Гидрогеоэкологические условия водоснабжения населения юга Сибирского региона / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, А.А. Балобаненко, В.Д. Покровский, А.Ф. Рехтин // Вестн. Том.гос. ун-та. - 2014. No 384. - С. 189 - 197.

### **Статьи в журналах из базы данных Scopus:**

1. Pokrovsky, V. Degree of Areal Drainage Assessment Using Digital Elevation Models / V. Pokrovsky, D. Pokrovsky, E. Dutova, A. Nikitenkov, A. Nazarov // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 21 012018 doi:10.1088/1755-1315/21/1/012018. - V. 21. - 2014.
2. Pokrovsky, V. The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using GIS-technology / V. Pokrovsky, D. Pokrovsky, E. Dutova, A. Nikitenkov // 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies In Geology, Exploration and Mining, [www.sgem.org](http://www.sgem.org), SGEM2014 GeoConference Proceedings, ISBN 978-619-7105-08-7 / ISSN 1314-2704, June 19-25, 2014, Vol. 2, 935 - 942 pp.

### **Публикации в других научных изданиях:**

1. Покровский, В.Д. Картографические построения и оценка дренированности территории. Сборник научных трудов XVIII международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения

недр». - Томск, 2014. - С. 477 - 478.

2. Покровский, В.Д. Этапы создания информационно-поисковой системы для оценки степени подтопляемости территории города Томска. Материалы Всероссийской научной геологической молодежной школы «Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от В.А. Обручева, М.А. Усова, Н.Н. Урванцева до наших дней», посвященные 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева, 130-летию академика М.А. Усова, основателям Сибирской горно-геологической школы и 120-летию Н.Н. Урванцева. - Томск, 2013. - С. 19 - 22.

3. Pokrovskiy, V.D. Value estimation of Tomsk town technogenic underflooding using GIS-technologies. Сборник научных трудов XVII международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2013. - С. 830 - 833.

4. Покровский, В.Д. Построение карты дренированности для оценки степени потенциальной подтопляемости территории г. Томска. Сборник научных трудов XVII международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2013. - С. 463 - 464.

5. Покровский, В.Д. Исследование процессов подтопления территории города Томска средствами геоинформационных систем. Сборник научных трудов Международного форума-конкурса молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2012. - С. 219.

6. Покровский В.Д. Оценка условий техногенного подтопления памятников архитектуры г. Томска средствами ГИС-технологий. Сборник научных трудов Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области наук о Земле «Современные технологии и результаты геологических исследований в изучении и освоении недр Земли». - Томск, 2011. - С. 144–148.

7. Покровский, В.Д. Моделирование процессов фильтрации. Сборник научных трудов XV международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2011. - С. 241.

8. Pokrovskiy, V.D. Watersupply of big European cities. Сборник научных трудов XV международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2011. С. 759–761.

9. Покровский, В.Д. Разработка карты типов фильтрационных разрезов для ранжирования территории города Томска по степени потенциальной подтопляемости. Сборник научных трудов XIV международной научной школы-конференции студентов и молодых ученых «Экология Южной Сибири и сопредельных территорий». - Абакан, 2010. - С. 178.

10. Покровский, В.Д. Схематизация гидрогеологических условий микрорайона Черемошники (г. Томск) для гидродинамического моделирования. Сборник научных трудов XIV международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2010. - С. 301 - 302.

11. Покровский, В.Д. Особенности водоснабжения ряда крупных городов Европы. Сборник научных трудов XIV международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2010. - С. 300 - 301.

12. Покровский, В.Д. Ранжирование памятников архитектуры г. Томска по степени

потенциальной подтопляемости с использованием геоинформационных технологий. Сборник научных трудов XIII международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2009. - С. 970 - 971.

13. Покровский, Д.С. Оценка характера и степени техногенного подтопления территории г. Томска с использованием геоинформационных технологий / Д.С. Покровский, К.И. Кузеванов, Е.М. Дутова, К.К. Кузеванов, В.Д. Покровский // Эколого-геологические проблемы урбанизированных территорий: II Всероссийская научно-практическая конференция - Екатеринбург, УГГУ, 25 - 26 ноября 2009. - Екатеринбург: - УГГУ, 2009. - С. 46 - 49.