

На правах рукописи

МИНИНА Марина Виссарионовна

ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ  
КАЧЕСТВОМ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ  
УРБАНИСТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена на кафедре Морских информационных технологий  
Российского государственного гидрометеорологического университета

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
Митько Валерий Брониславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Алёшин Игорь Владимирович  
кандидат технических наук, доцент  
Куракина Наталья Игоревна

Ведущая организация – Санкт-Петербургский Государственный  
политехнический университет

Защита состоится « 22 » апреля 2010 года в 17-00 на заседании  
диссертационного совета ДС 212.197.03 в Российском государственном  
гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург,  
пр. Металлистов, д.3, аудитория 406<sup>б</sup>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат диссертации разослан «20» марта 2010 года

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор технических наук, профессор

Бескид П.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Концепция безопасного обеспечения населения питьевой водой является одной из основных в формировании концепции Устойчивого развития, провозглашённого ООН на XXI век. Следствием этих решений явились программы и проекты, ориентированные на конкретные регионы мира, включая арктические.

В большинстве населенных пунктов России питьевая вода по некоторым важным качественным показателям не соответствует установленным стандартам и санитарным нормам. Это связано не только с устаревшими технологиями водочистки, применяющимися на централизованных водопроводных станциях, но, главным образом, с повторным загрязнением питьевой воды в наружных и внутренних водопроводных сетях.

В федеральном масштабе это привело к формированию государственной программы «Чистая вода», включению этих вопросов в Доктрину продовольственной безопасности РФ и отражено в ряде других проектов и принятых программ, таких как проект национальной программы действий «Вода России – XXI век», проект федеральной программы «Обеспечение населения России питьевой водой» и других. Все вышеизложенное является основанием для проведения исследований, направленных на разработку технологий обеспечения качественного питьевого водоснабжения урбанистических сообществ различного типа и масштаба.

**Состояние исследования проблемы.** Применительно к рассматриваемому направлению можно указать на работы учёных секции Геополитики и безопасности РАЕН по социально-политическому проекту «Актуальные проблемы безопасности социума» под руководством председателя научного совета Совета безопасности РФ Пирумова В.С., в области объектно-ориентированных геоинформационных систем работы лаборатории объектно-ориентированных ГИС СПИИРАН (Попович В.В., Ивакин Я.А.), УНЦ «ГИС технологии» ЛЭТИ (Алексеев В.В., Куракина Н.И.), в области методологии оценки рисков работы СПбГПУ (Дубаренко К.А., Гуменюк В.И., Яковлев В.В.), в области ГИС работы ГМА им. С.О.Макарова (Биденко С.И.), РГГМУ (Бескид П.П.), в области логико-

вероятностных методов работы ВМА им. Н.Г. Кузнецова (Рябинин И.А., Можяев А.С., Поленин В.И.), в области экологических аспектов оценки характеристик водных объектов работы СПбГУ (Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю.), РГГМУ (Шелутко В.А., Фрумин Г.Т., Скакальский Б.Г., Ковчин И.С.), СПбГУРП (Шишкин А.И., Епифанов А.В.). Инновационные подходы и маркетинговые вопросы рассматривались в работах Института инноватики СПбГПУ (Туккель И.Л., Колосова О.В.). Из зарубежных исследователей следует указать на работы ежегодной конференции «Неделя воды» в Стокгольме, Швеция, «День Балтийского моря» в Санкт-Петербурге и др.

Однако существуют резервы улучшения качества систем питьевого водоснабжения, которые определяются всё более точными моделями систем управления качеством питьевого водоснабжения с использованием объектно-ориентированных ГИС, развитием информационных технологий оптимизации распределения усилий на основе оценки рисков водопотребления с учётом обстановки в источниках, системе транспортировки и реализации. Таким образом объектом настоящего исследования являются современные системы питьевого водоснабжения, а предметом исследования – комплексная система управления качеством питьевого водоснабжения урбанистических сообществ различного масштаба.

**Актуальность диссертационного исследования** обусловлена необходимостью совершенствования технологий водоочистки и природных источников водоснабжения, подверженных природным и антропогенным воздействиям, градостроительных особенностей, разработки способов повышения качества питьевого водоснабжения урбанистических сообществ различного масштаба.

Исследования по теме ранее выполнялись в рамках НИР «ЯкутХАБИТАТ», «МурманХАБИТАТ», а также будут продолжены в рамках плановых НИР «КрасноярскХАБИТАТ» и «БалтХАБИТАТ».

**Основной целью** работы является разработка информационных технологий для повышения эффективности управления качеством питьевого водоснабжения в соответствии с критериями, принятыми в мировом сообществе.

**Для достижения указанной цели решены следующие задачи:**

-осуществлён анализ факторов, определяющих качество питьевого снабжения в различных регионах, при различных способах водоснабжения и применения средств водоочистки;

-разработана геоинформационная модель системы водоснабжения с учетом влияния среды и технических характеристик средств, составляющих ее основные элементы, выявлены технические факторы, наиболее существенно влияющие на эффективность функционирования системы, с оценкой ее адекватности содержанию решаемых задач;

-обоснованы предложения по оптимизации системы водоснабжения, основанные на удовлетворении мировым критериям его качества;

-выработаны рекомендации по рациональному оборудованию урбанистических сообществ элементами питьевого сообщения, основанными на инновационных технологиях;

-обоснована целесообразность внедрения разработанных предложений.

**Основными методами исследований** являлись анализ и обобщение данных, формирование базы данных в геоинформационной системе, аналитический расчёт, алгоритмизация и программирование, имитационное моделирование и статистический анализ. Основным инструментом реализации указанных методов явилось применение общей теории статистических решений, ГЭП-анализа, основанного на логико-вероятностных и логико-статистических методах, объектно-ориентированное моделирование, машинный эксперимент и сопоставление его результатов с данными, полученными в ходе исследования. Разработанные модели, алгоритмы и методики программно реализованы на персональном компьютере

**На защиту выносятся:**

1. Концепция информационной поддержки управления качеством водоснабжения урбанистических сообществ на базе ГИС- технологий.
2. Геоинформационная модель управления качеством питьевого водоснабжения с учётом характеристик источника, индикаторов качества и факторов влияния.

3. Логико-вероятностный метод оценки рисков некачественного водопотребления и построения георельефа рисков в ГИС.
4. Методика обоснования масштаба урбанистического сообщества в системе доочистки воды при централизованном водоснабжении.
5. Методика сравнительной оценки соответствия российских и международных «индикаторов устойчивого развития» в части хозяйственно-питьевого водоснабжения на основе ГЭП - анализа.

**Кроме того, в качестве дополнительных научных результатов выдвигаются следующие:**

Рекомендации по рациональному оборудованию городов и населённых пунктов системами водоподготовки для хозяйственно-питьевых целей.

Предложения по структуре базы данных источников водоснабжения в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в геоинформационной системе.

**Научная новизна** результатов исследований заключается в разработке концепции информационной поддержки управления качеством водоснабжения урбанистических сообществ на базе объектно-ориентированной геоинформационной модели, применении ГЭП-анализа, логико-вероятностного метода и обосновании предложений по улучшению качества питьевого водоснабжения урбанистических сообществ различного масштаба.

**Теоретическая и практическая значимость** исследований состоит в дальнейшем развитии логико-вероятностных и логико-статистических методов объектно-ориентированного моделирования структурно-сложных информационных систем. К основным практическим результатам можно отнести анализ, обобщение и оценку данных по характеристикам источников водопотребления региона в геоинформационной системе СЗФО, влияющих на качество питьевого водоснабжения сегментов населённых пунктов региона, рекомендации по выбору параметров и структуры системы питьевого водоснабжения с учётом мировых индикаторов.

**Достоверность** научных положений и выводов подтверждена непротиворечивостью полученных результатов данным в литературных источниках, коррект-

ным применением современных методов математико-статистической обработки исходных данных, согласием с экспертными оценками.

**Личный вклад автора** заключается в формулировке задач, методическом обеспечении их решения и анализе полученных результатов.

**Использование результатов исследований.** Автор участвовал в ряде НИР и ОКР РосНИПИУрбанистики РФ и СПб университета растительных полимеров, относящихся к оптимизации схем территориального планирования и оценки качества воды в соответствии с мировыми стандартами. Основные результаты работы использованы в НИР «ЯкутУрбан», «МурманУрбан», учебном процессе РГГМУ, СПб УРП, Таганрогского радиотехнического университета, ООО «Прогноз-Норд», НИЦ «Потенциал-2». Автор удостоен диплома второй степени губернатора Санкт-Петербурга за инновационный проект в области питьевого водоснабжения.

**Апробация работы.** Результаты исследований обсуждались на международных конференциях: «День Балтийского моря 2006, 2007, 2008, 2009», «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов 2008, 2009», «МОРИНТЕХ-97» и межвузовских (1995г., 1996г., 1997г.) конференциях по радиоэлектронике в ЛЭТИ им. А.С. Попова, СПбГПУ, ТРТУ, РАГС при Президенте РФ.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 29 работах автора, включающих научные статьи, тезисы докладов и отчёты по НИР и ОКР.

**Объем и структура работы.** Работа объемом 150 страниц состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 150 наименований, содержит 35 рисунков, 11 таблиц и Приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется целевая установка, определяется содержание научных исследований в интересах народно-хозяйственных задач на основе устойчивого развития.

В первой главе обобщаются данные по существующим принципам и моделям водоснабжения урбанистических сообществ различного масштаба от индивидуального до городского применительно к региону Санкт-Петербурга и Ленинградской области с формированием базы данных по имеемым и используемым источникам, их характеристикам и факторам, определяющим качество воды на различных этапах от источника до потребителя. Анализируются и классифицируются существующие способы формирования требуемого качества воды. Производится сравнительный анализ показателей качества жизни в части хозяйственно-питьевого снабжения на основе международной системы индикаторов устойчивого развития, что отражено на рис. 1.

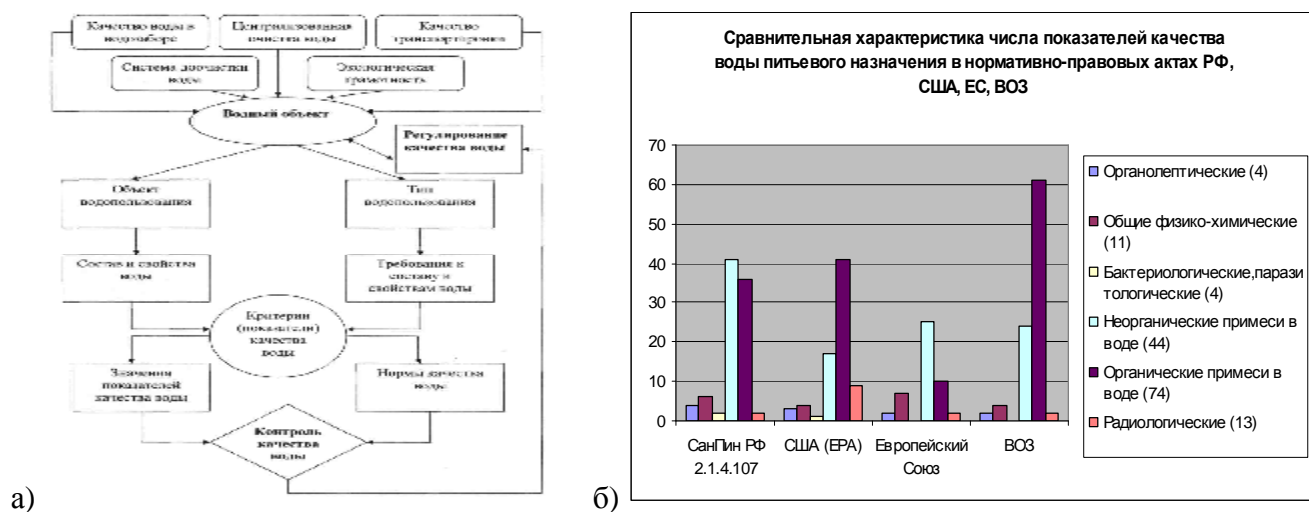


Рис. 1. Структура категории «качество воды» (а) и сравнительное число показателей качества в различных мировых сообществах (б).

Для оценки рисков водопотребления приемлемым является применение ГЭП-анализа, позволяющего оценить степень приближения вектора реальных параметров водопотребления к соответствующим индикаторам устойчивого развития.

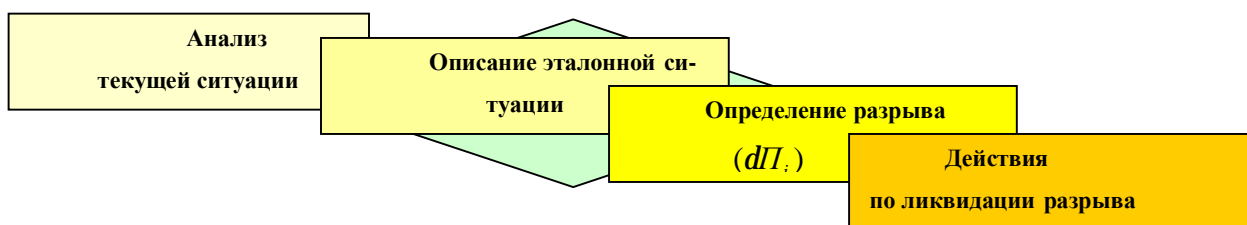


Рис. 2. Алгоритм ГЭП- анализа качества питьевого водопотребления



Физической основой оценки пространственного распределения параметров водной среды является их зависимость от координат в геоинформационной системе. В общем случае вектор параметров воды на входе измерителя при заданных интервалах пространства  $\vec{r} \in R$  и интервалах времени  $t \in [T_i, T_j]$  можно представить в виде

$$p(t, \vec{r}) = P_s(t, \vec{r}, \vec{a}) \exp\{jj(t, \vec{r})\} + p_n(t, \vec{r}) \}, \quad (1)$$

где  $\vec{r} = f(x, y, z)$  - пространственная координата  $\vec{a}$  - вектор измеряемых параметров.

В работе обоснована целесообразность измерения отличия параметров от выбранных норм и определения тенденции этих отличий за последние несколько лет, позволяющих прогнозировать ситуацию в соответствии с соотношением

$$grad\Pi_i = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d\Pi_i, \quad (2)$$

что представлено в таблице:

Тенденция изменений показателей качества вод питьевого назначения (превышение ПДК) по неорганическим и органическим примесям в воде за период 2000-2008гг

Код водозабора	Годы	Неорганические примеси в воде							Органические примеси в воде			
		Медь Cu	Свинец Pb	Марганец Mn	Цинк Zn	Железо Fe	Кадмий Cd	Нитраты (по азоту)	Бензол	Бензин	Фенол	Аммиак (по азоту)
1	2000-2008	+0,11	+0,001	+0,10	+0,01	-0,05	-0,01	+0,06	+0,01	-0,001	+0,11	-
2	2000-2008	+0,10	+0,001	+0,09	+0,01	-0,05	-0,01	+0,07	+0,01	-0,001	+0,11	-
3	2000-2008	+0,12	+0,001	+0,11	+0,01	-0,09	-0,01	+0,08	+0,02	-0,001	+0,15	-

Тенденция изменений показателей качества вод питьевого назначения (превышение ПДК) по органолептическим и физико-химическим показателям за период 2000-2008гг

Код водозабора	Годы	Органолептические				Общие физико-химические			
		Запах	Привкус	Цветность	Мутность	Водородный показатель рН	Общая минерализация мг/л	Жесткость воды мг-экв/л	Окисляемость перманганатная мг О <sub>2</sub> /л
1	2000-2008	-0,01	-0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,02	+0,01	+0,01
2	2000-2008	-0,01	-0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,03	+0,01	+0,01
3	2000-2008	-0,01	-0,01	+0,01	+0,02	+0,02	+0,03	+0,02	+0,01

Эти характеристики рекомендуется формировать в базе данных ГИС для использования при расчёте рисков некачественного водопотребления. Основным итогом исследований, представленных в главе 1, является разработка инфологической модели базы данных «Управление качеством питьевого водоснабжения»,

представленной на рис.3. Такой подход позволяет реализовать методику оценки качества воды с учётом пространственных характеристик территорий и масштабов урбанистических сообществ с использованием ГИС.

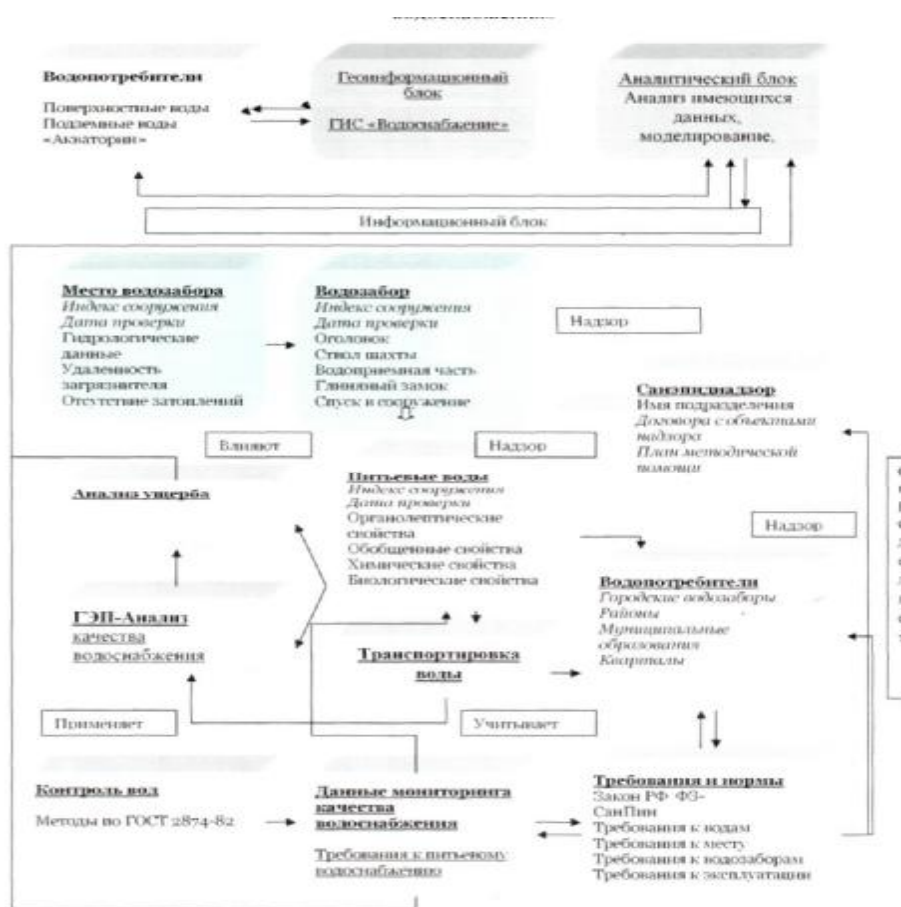


Рис. 3. Инфологическая модель управления качеством централизованного питьевого водоснабжения

Реализация базы данных в ГИС позволяет осуществлять пространственный анализ качества питьевого водоснабжения урбанистических сообществ и визуализацию сложившейся обстановки. Выявленные в процессе исследования негативно эволюционирующие факторы определили необходимость разработки концепции информационной поддержки управления качеством водоснабжения на базе ГИС- технологий и системного учёта их эволюции при прогнозировании и оптимизации питьевого водопотребления. Формирование базы данных и базы знаний в ГИС по источникам водоснабжения является важным элементом технологий информационной поддержки управления качеством питьевого водопотребления при

управлении развитием территорий и оценке рисков некачественного водопотребления урбанистических сообществ различного типа и масштаба.

Во второй главе на основе сформированной инфологической модели управления качеством водопотребления, разрабатывается **геоинформационная модель управления качеством питьевого водоснабжения**, учитывающая специфику влияния различных факторов на способы формирования требуемого качества воды в различных точках цикла потребления. Применительно к Санкт-Петербургу в качестве примера исследуется Кировский район с тремя пунктами водозабора и типовым кварталом застройки. Результатом комплексного подхода к оценке рисков водопотребления в ГИС явился практический расчёт для выбранного типового квартала пространственного распределения показателей качества воды, пример которого представлен на рис. 4, и георельефа рисков, показанного на рис. 5. Разработанная геоинформационная модель предлагается в качестве эффективного инструмента при решении задач управления развитием территорий на региональном и муниципальном уровнях, территориальном планировании и эксплуатации систем питьевого снабжения в урбанистических сообществах различного масштаба.

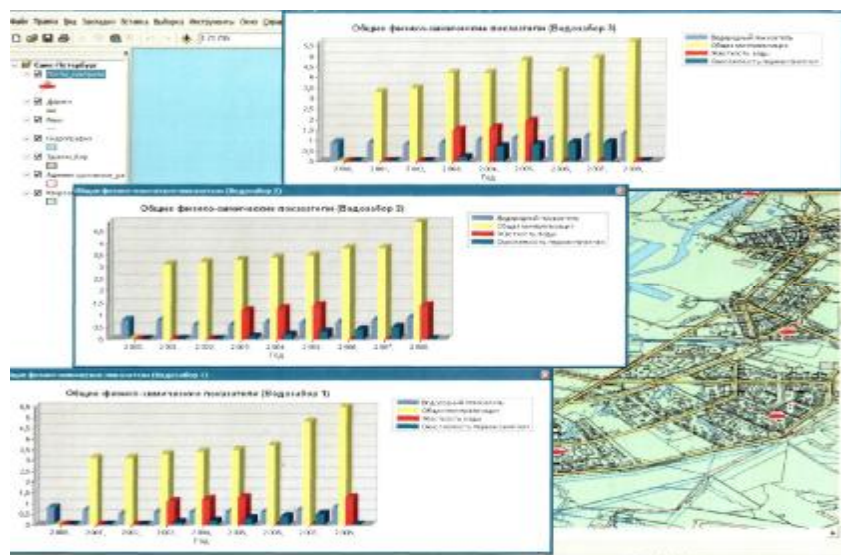


Рис. 4. Пример визуализации в ГИС общих физико-химических показателей в трёх точках водозабора Кировского района Санкт-Петербурга

Для целей территориального планирования эффективным средством является построенный в ГИС георельеф рисков, определяющий распределение по территории

необходимые средства водоподготовки. Количественные оценки рисков водопотребления могут быть сделаны на основе логико-вероятностных методов, развиваемых в работе.

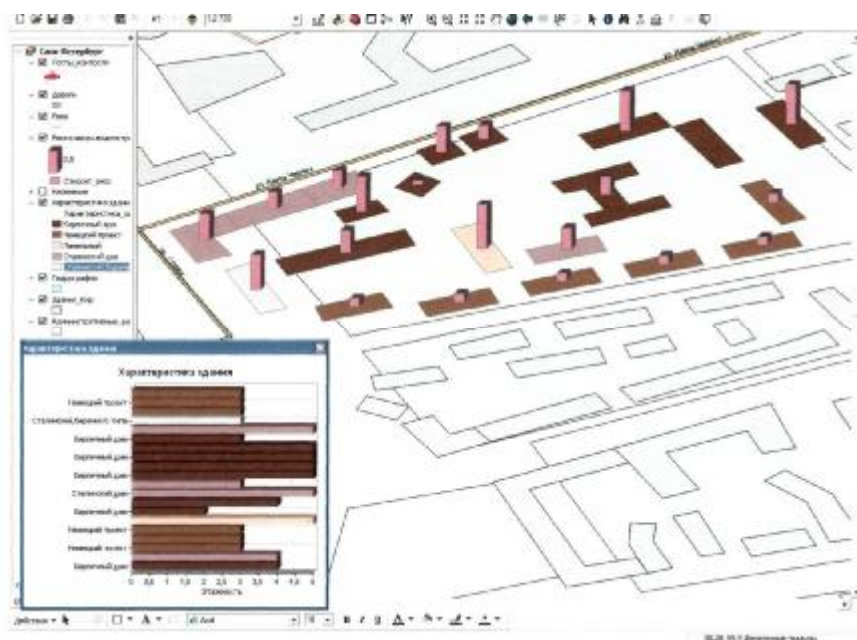


Рис. 5. Пример визуализации георисков для типового квартала Кировского района Санкт-Петербурга

**Третья глава** посвящена обоснованию комплексного подхода к оценке рисков в структурно сложных системах. Рассмотрены три основных подхода:

- с применением критериев, основанных на расчёте мультипликативных показателей по методу школы проф. Яковлева В.В.
- по методикам, используемым Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга;
- с применением логико-вероятностных методов школы проф. Рябина И.А.

*При использовании мультипликативных показателей риска* некачественного водопотребления в работе адаптирован показатель - мера риска  $R$  определяемый как свертка (зачастую - произведение) вероятности  $W$  реализации аварии и вероятного относительного ущерба  $M$  по формуле:

$$R=WM \tag{3}$$

где  $R$  - количественная мера (степень) риска;  $W$  - вероятность возникновения аварии;  $M$  - вероятный относительный ущерб при аварии. Значение риска в мультипликативном представлении можно трактовать как математическое ожидание

ущерба. Вероятность  $W$  возникновения аварии определяется на основе анализа условий эксплуатации системы и обработки статистических данных об авариях. В простейшем представлении используя закон Пуассона распределения времени между авариями, полагая, что наступления аварий образуют простейший поток случайных событий, принимается:

$$P(\geq 1, t) = 1 - P(0, t) = 1 - \exp(-I \cdot t) = W, \quad (4)$$

Как мера риска возникновения аварии на рассматриваемом объекте за интересующий интервал времени  $t$ .

Таким образом, в инженерных оценках может быть рассчитана вероятность  $W$  возникновения аварии. Вероятный относительный ущерб  $M$  рассчитывается по следующей методике. На основе моделирования аварийной ситуации прогнозируются материальные  $M_v$  и людские  $N_v$  потери вследствие воздействия формируемых в аварии поражающих факторов. По таблице Классификации чрезвычайных ситуаций (Постановление Правительства РФ от 13.9.96 №1094) определяется вид чрезвычайной ситуации и соответствующие максимальные значения возможного материального ущерба  $M_{\max}$  или гибели людей  $N_{\max}$ . Тогда:  $M_m = M_v / M_{\max}$ , или  $M_n = N_v / N_{\max}$ , где  $M_m$ ,  $M_n$  – вероятный относительный материальный и людской ущербы соответственно.

По этой методике несчастный случай со смертельным исходом взрослого человека оценивается суммой 80 000 руб, а расчеты выполняются по формуле:

$$M = \frac{k \cdot M_v + g \cdot N_v}{k \cdot M_{\max} + g \cdot N_{\max}}, \quad (5)$$

где коэффициент  $k$  приводит к единой мере финансовые единицы измерения ущербов, коэффициент  $g$  равен выбранной мере стоимости жизни одного человека в единицах, соответствующих единицам ущерба. Здесь можно, например, в качестве стоимости человеческой жизни в течение определённого её сокращения при некачественном питьевом водоснабжении на 5-6 лет оценить её порядка 6%-8% от максимальной.

*Принципы определения риска в соответствии со справочными пособиями Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению*

экологической безопасности Санкт-Петербурга основаны на применении в качестве интегральной характеристики загрязнения поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям (принятой в системе Росгидромета) и используются классы качества воды, отнесение к которым производится по величине расчётного комплексного показателя – «Индекса загрязнённости вод» (ИЗВ). Для поверхностных вод суши расчёт ИЗВ проводится для каждого пункта (створа) по формуле:

$$ИЗВ = \frac{\sum_{i=1}^{i=6} (C_i / ПДК_i)}{6}, \quad ( 6 )$$

где  $C_i$  - среднее годовое значение определяемого показателя;  $ПДК_i$  - предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества; цифра «6» - строго лимитируемое число показателей, берущихся для расчета, включая в обязательном порядке растворенный кислород и БПК<sub>5</sub>.

Для представления качества вод в виде единой оценки показатели выбираются независимо от лимитирующего признака вредности; при равенстве концентраций предпочтение отдается веществам, имеющим токсикологический признак вредности.

Анализ риска - это научный метод сопоставления опасностей, разработка стратегии безопасного развития общества. В настоящее время оценка риска является ключевым звеном исследований по экологической безопасности как на межгосударственном, так и на национальном уровне. В индустриально развитых странах практически все программы мониторинга качества воды основаны на современных концепциях анализа, оценки и управления риском загрязнения природных водных экосистем токсичными химическими веществами.

Среди приоритетных химических веществ, загрязняющих водные объекты, особое место занимают металлы. В связи с изложенным, представлялось целесообразным провести количественную оценку уровней загрязнения водотоков города металлами. С этой целью был разработан новый подход, базирующийся на концепции риска. По сути, применительно к рассматриваемой проблеме оценка риска - это вид экспертных работ, направленных на определение числа представительных видов гидробионтов, способных проявить негативные реакции на воздей-

ствие конкретного неблагоприятного фактора, действующего с определенной силой и в заданный промежуток времени.

Учитывая, что риск является вероятностной величиной, для определения риска комбинированного действия в соответствии с правилом умножения вероятностей, где в качестве сомножителей выступают не величины рисков, а значения, характеризующие вероятности их отсутствия, применяется следующее уравнение:

$$R_{\text{comb}} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \dots (1 - R_n), \quad (7)$$

где  $R_{\text{comb}}$  - риск комбинированного воздействия катионов металлов;  $R_i$  риск воздействия отдельных катионов металлов.

Использование приведенного выше уравнения позволило рассчитать уровни загрязнения водотоков Санкт-Петербурга металлами по величинам потенциальных комбинированных рисков. Для расчетов были использованы средние за год концентрации меди, цинка, свинца, марганца, железа, кадмия и кобальта.

*При применении логико-вероятностного метода для оценки рисков* некачественного водопотребления современные системы питьевого водоснабжения можно отнести к классу структурно-сложных систем. Разнообразие существующих систем и выбор класса структурно-сложных систем для последующего исследования может быть основан на анализе инфологических моделей централизованного, децентрализованного и смешанного водоснабжения, имеющие как структурные, так и географические особенности. К примеру первый тип более адекватен крупным городам, второй – сельской местности, третий – населённым пунктам с окраинными территориями. В данной работе рассмотрены только структурно-сложные системы (ССС), к которым относятся системы питьевого водоснабжения всех трёх типов.

Понятие сложности учитывает как сложность структуры системы, так и сложность функций, реализуемых системой. Под «сложной системой» понимается система, которую можно описать не менее чем на двух различных математических языках. Под «структурно-сложными системами» в работе понимаются такие системы, которые при математическом описании не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам. Структурно-сложные

системы описываются сценариями сетевого типа с циклами и неустранимой повторностью аргументов при их формализации. Независимо от природы изучаемой ССС при решении соответствующих задач используются одни и те же абстрактные модели, а именно логико-вероятностные.

Единственным практически реальным и доступным путем для проектирования и исследования ССС является моделирование. Здесь будет уместным сказать, что большинство реальных систем водоснабжения относятся именно к классу ССС, но из-за математических трудностей они пока изучаются в основном описательным путем. Больше повезло структурно-простым системам (СПС), для исследования которых разработаны количественные методы.

Логико-вероятностное исчисление - специальный раздел дискретной математики, в котором установлены четкие правила замещения логических аргументов ( $x_i$ ) в функциях алгебры логики -  $y(x_1 \dots, x_n)$  вероятностями их истинности  $P\{x_i = 1\}$  и логических операций: конъюнкции ( $\wedge$ ), дизъюнкции ( $\vee$ ), отрицания ( $\neg$ ) арифметическими операциями: умножения ( $\times$ ), сложения ( $+$ ), вычитания ( $-$ ). Вероятностная функция (ВФ) — это вероятность истинности функции алгебры логики, т.е.  $P\{y(x_1 \dots, x_n) = 1\}$ .

Логическое уравнение — аналитическая запись задачи о разыскании значений аргументов, при которых значения двух данных функций равны

$$f_1(x_1, \dots, x_n) = f_2(x_1, \dots, x_n), \quad (8)$$

где  $x_n$  - неизвестные аргументы.

Решениями (корнями) уравнения являются такие значения неизвестных аргументов  $x_i$ , при которых соблюдается равенство (8). О таких значениях неизвестных говорят, что они удовлетворяют данному уравнению. Системой уравнений называется совокупность уравнений, для которых требуется найти значения неизвестных, удовлетворяющих одновременно всем уравнениям. Хотя слова «логические уравнения» уже присутствовали в некоторых работах, авторы ввели понятие системы логических уравнений в виде

$$y = y(f_1, f_2, \dots, f_n), \quad (9)$$

$$f_i = a_{i1} \vee a_{i1} f_1 \vee a_{i2} f_2 \vee \dots \vee a_{in} f_n = 1, \dots, n, \quad (10)$$



где  $a_i$  - функции алгебры логики, выраженные через логические переменные  $x$ .

Под логико-вероятностной теорией безопасности (ЛВТБ) следует понимать основные знания по расчетам опасности возникновения аварий и катастроф структурно-сложных систем, базирующиеся на логическом представлении развития опасных состояний и математических методах вычисления истинности функций алгебры логики, представляющих ФОС.

Демонстрационный пример применения информационной технологии ОЛВМ в специализированной системе автоматизации проектирования, мониторинга и управления эксплуатацией централизованных систем водоснабжения (ЦСВ) выполнен для системы, представленной на рис. 7.

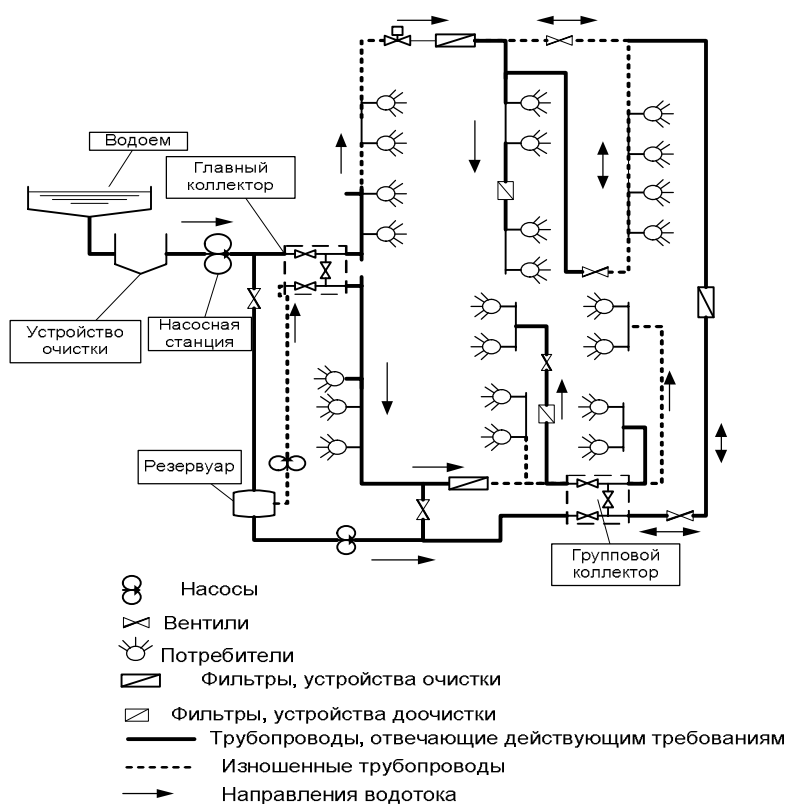


Рис. 7. Модель централизованной системы водоснабжения

Эта модель включает все атрибуты ЦСВ со следующими структурными и качественными характеристиками:

Ориентировочный масштаб – район города с населением порядка 10-15 тыс. чел. Каждый из показанных на схеме потребителей соответствует жилому дому или микрорайону с 3-15 домами с населением численностью порядка 1 тыс. чел. каждый. В задаче требуется: оценить надежность ЦСВ в функции текущего вре-

мени в основном и резервном режимах функционирования; оценить критически важные объекты (элементы) ЦСВ и степень деградации ЦСВ при их выходе из строя; рассчитать риски некачественного питьевого водопотребления (т.е. отличия реальных векторов параметров качества воды от нормативных) для ЦСВ и НЦСВ; оценить целесообразные мероприятия по совершенствованию и восстановлению ЦСВ (замене устаревших элементов) и достигаемый эффект.

Схема функциональной целостности ЦСВ по первому варианту исходных данных для основного режима функционирования, составленная средствами графического интерфейса ПК АСМ на фоне структуры ЦСВ, представлена на рис.8.

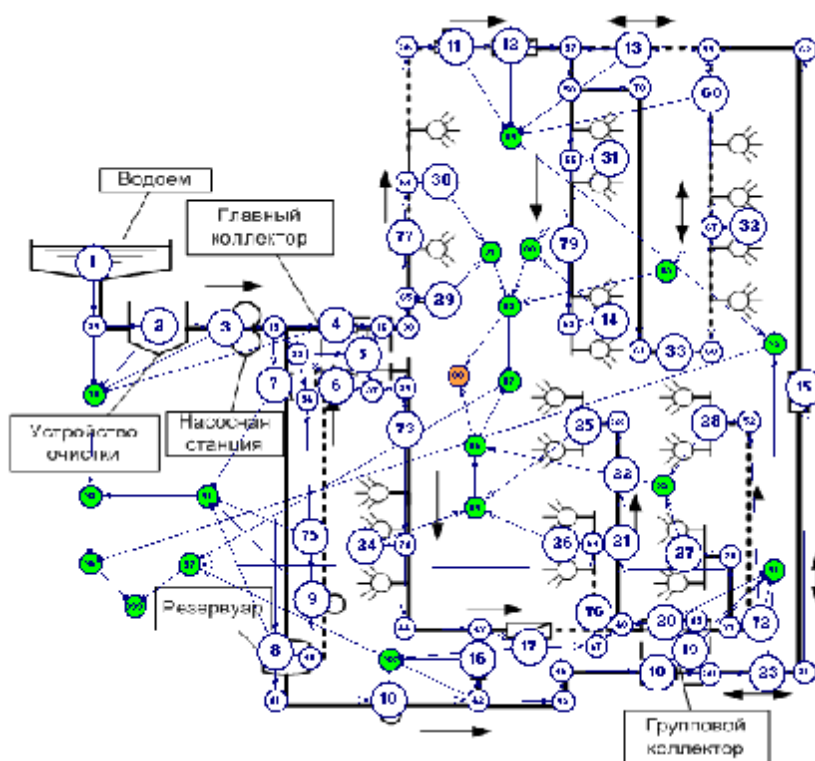


Рис. 8. Схема функциональной целостности на фоне структурной схемы ЦСВ в основном режиме функционирования

Зеленым цветом выделены фиктивные вершины, связанные с расчетом показателей надежности и риска. Фиктивная вершина 95 отражает показатель надежности системы потребителей водоснабжения, а вершина 96 – системы обеспечения водоснабжения. Каждая из этих вершин дизъюнктивно объединяет кустовые схемы, частные показатели которых формируются дизъюнктивным и конъюнктивным объединением соподчиненных элементов согласно логике их взаимодействия. Фиктивная вершина с номером 999 отражает комплексный пока-

затель надежности ЦСВ. Расчет показателя безотказности функционирования ЦСВ осуществлялся последовательно для указанных выше двух вариантов ЦСВ: первый – имеющей устаревшие элементы и трубопроводы, второй – имеющей улучшенные элементы и трубопроводы.

Результаты расчета показателя безотказности функционирования ЦСВ в основном режиме функционирования представлены в окне моделирования и расчетов ПК АСМ (рис. 9).

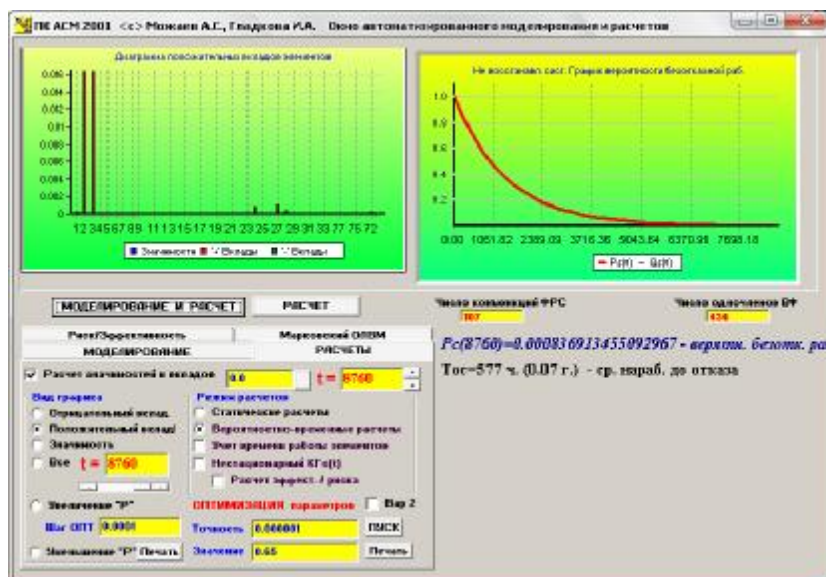


Рис. 9. Окно моделирования и расчетов ПК АСМ с результатами оценки показателей безотказности функционирования ЦСВ за 1 год в основном режиме функционирования

Полученное значение показателя свидетельствует о низкой надежности ЦСВ в целом. Средняя наработка на отказ составляет всего 577 час или около 24 суток. Вместе с тем, она подтверждается средними статистическими характеристиками возникновения отказов на реальных ЦСВ. *Приведённые информационные структуры и алгоритмы характеризуют ОЛВМ, как эффективный и перспективный пример информационной технологии обеспечения управления качеством питьевого водоснабжения.*

Практическое применение ОЛВМ для моделирования и расчета различных характеристик сложных систем облегчается тем, что все основные технологические этапы построения логических, вероятностных моделей и вычисления показателей полностью автоматизированы и реализованы в программных комплексах

автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ). Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем «АРБИТР» (ПК АСМ СЗМА) аттестован Советом по аттестации программных средств Ростехнадзора РФ и в настоящее время используется промышленными организациями РФ.

На исследователя возлагается только задача составления СФЦ, то есть задача, свойственная проектировщикам систем. Нет необходимости ни выбора метода, ни аналитической работы по составлению и решению систем алгебраических или дифференциальных уравнений. Таким образом, применением ОЛВМ достигается радикальное разрешение проблемы перехода от качественной графической формы модели структурно-сложной технической системы к формальной вероятностной математической модели с автоматическим обеспечением ее адекватности графической модели и корректности программной реализации.

**В четвёртой главе** на основе разработанных геоинформационных технологий выполнено экономическое обоснование целесообразных способов водоподготовки в зависимости от ситуаций, обобщены данные по производителям и потребителям, произведён SWOT-анализ предлагаемого к формированию инновационно ориентируемого эко-кластера в области водоснабжения, обоснована стратегия коммерциализации предлагаемых технологий и оценена ожидаемая эффективность инвестиций в маркетинговые мероприятия.

Анализ технических характеристик и обоснование критериев качества систем водоподготовки показывает, что среди различных путей обеспечения населения в короткие сроки качественной и доступной по цене питьевой водой, наиболее перспективными, по критерию социально-экономической целесообразности и оценке экспертов являются системы очистки питьевой воды для определённого масштаба социума. Для обоснования оптимального масштаба урбанистического сообщества для оборудования средствами водоподготовки в работе адаптируется подход, основанный на методе целевой функции школы СПбГПУ, который предполагает более корректное определение существа риска по сравнению с выражением ( 5 ). Кроме параметров, участвующих в решении за-

дачи определения значений риска по мультипликативному критерию, необходима дополнительная информация о затратах и о потенциальной экономической (платежной) способности предприятия, региона или лица, ответственного за принятие решения. Целевая функция риска  $L(c)$  рекомендована в работе в следующем виде:

$$L(c) = \frac{c_0 \cdot (1 - W(c_k))}{S} + \frac{[(k \cdot M_v + g \cdot N_v) - m(c_1)] \cdot W(c_k)}{k \cdot M_{\max} + g \cdot N_{\max}}, \quad (11)$$

где  $C_0$  - затраты на создание технической системы (объекта);  $W(c_k)$  - вероятность возникновения аварийной ситуации, значение которой определяется средствами  $c_k$ , затрачиваемыми на предотвращение возникновения аварийной ситуации;  $M_v$  - прогнозируемый ущерб материальным ценностям и окружающей природной среде;  $N_v$  - прогнозируемые людские потери в размерности выбранных финансовых средств;  $c_1$  - затраты на обеспечение безопасности системы (снижение ожидаемого ущерба);  $c_k$  - средства, выделяемые на предотвращение аварий;  $k, g$  - коэффициенты приведения стоимостных показателей ущерба и потери населения к единой мере;  $m(c_1)$  - функция предотвращенного ущерба, значение которой определяется выделяемыми средствами  $c_1$ :

$$m(c_k) = k \cdot m_v(c_M) + g \cdot n_v(c_N) \quad (12)$$

$m_v(c_M)$  - предотвращенный материальный ущерб;  $n_v(c_N)$  - предотвращенный ущерб вследствие людских потерь;  $c_1 = c_M + c_N$ ;  $S$  - потенциальная платежная способность заказчика или лица, ответственного за принятие решения.

$$S \geq c_0 + c_M + c_N + c_k \quad (13)$$

Вероятность негативного воздействия на среду обитания  $W(c_k)$  может быть представлена в виде зависимости от надежности исследуемой технической системы:

$$W(c_k) = W(c_x) \cdot [1 - P(c_y)] \quad (14)$$

где  $c_k = c_x + c_y$ ;  $W(c_x)$  - вероятность развития аварии (отказа, поломки) технической системы или технологического процесса в чрезвычайную ситуацию. Значение этой вероятности зависит от объема средств  $c_x$ , выделенных на локализацию аварии;  $P(c_y)$  - надежность (вероятность безотказной работы) технической систе-

мы или технологического процесса, значение которой зависит от средств су , выделенных на повышение надежности.

Краткий анализ обоснованной целевой функции показывает, что при стремлении вероятности возникновения аварии к нулю величина функции риска стремится к отношению затрат на создание системы (объекта) к потенциальным платежным способностям (состоянию) заказчика. При стремлении вероятности возникновения аварии к единице - значение показателя риска определяется вторым слагаемым, т.е. относительным ущербом. Это определяет целесообразность оптимизации масштаба урбанистического сообщества, рекомендуемого для обеспечения средствами водоочистки. В реальных условиях на основе анализа целевой функции таким масштабом является в настоящее время современный дом или кондоминиум с населением порядка 300-400 человек. При таких условиях минимальной удельной ценой (на каждого члена социума) обеспечивается заданное значение степени риска коллективов 200-300 человек. При потреблении индивидуумом 3-5 литров в сутки общее количество воды составит 1000 – 1500 литров в сутки. Практическим примером в работе явился анализ технических принципов и средств подобных систем и выполнен SWOT-анализ обоснованного средства питьевого водоснабжения для коммерциализации научных обоснований. На сегодняшний день потребление населением питьевой воды проиллюстрировано на рис. 9.

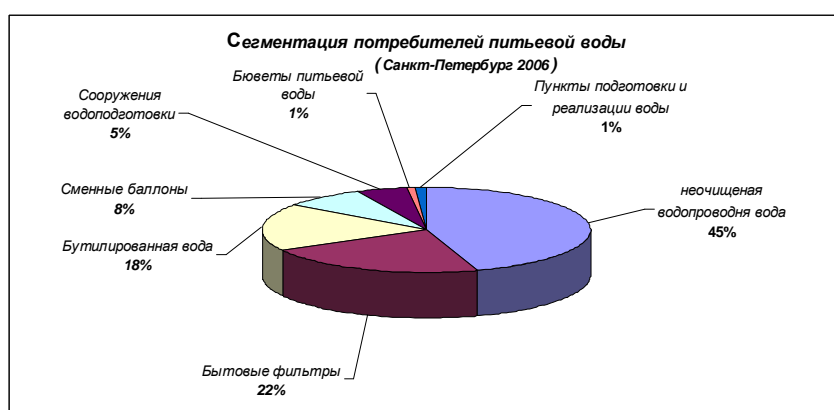


Рис. 9. Сегментация потребителей питьевой воды

По научным обоснованиям, выполненным в работе, уже в ближайшее время благодаря деятельности формируемого инновационного кластера сегмент потре-

бителей питьевой воды с применением системы водоочистки возрастёт от 7% до 60% целевой аудитории в Санкт-Петербурге.

В заключении приводятся итоги работы, перечисляются полученные научные и практические результаты, раскрывается степень их достоверности, новизны и вклада в науку и практику, указываются сведения о реализации научных результатов, а также предложения по дальнейшему использованию результатов исследования, отмечаются нерешённые вопросы, которые могут служить предметом дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

Решение задач диссертационного исследования позволило получить новые научные и практические результаты, составляющие концепцию информационной поддержки управления качеством водопотребления в урбанистических сообществах различного масштаба.

1. Разработанная геоинформационная модель управления качеством питьевого водоснабжения с учётом характеристик источника, индикаторов качества и факторов влияния позволяет реализовать методику оценки качества водопотребления с учётом пространственных характеристик территорий и масштабов урбанистических сообществ.

2. Логико-вероятностный метод оценки рисков некачественного водопотребления и построения георельефа рисков в ГИС обеспечивает адекватные практике водопользования результаты и с его применением достигается радикальное разрешение проблемы перехода от качественной графической формы модели структурно- сложной технической системы к формальной вероятностной математической модели.

3. Методика обоснования масштаба урбанистического сообщества в системе доочистки воды при централизованном водоснабжении является научно обоснованной информационной поддержкой принятия решений об основных направлениях технической и социальной политики в области питьевого водоснабжения.

4. Методика сравнительной оценки соответствия российских и международных «индикаторов устойчивого развития» в части хозяйственно-питьевого водоснабжения на основе ГЭП-анализа показывает целесообразные направления деятельности научных, технических и общественных организаций по решению проблем обеспечения безопасности социума в рассматриваемой области.
5. Рекомендации по рациональному оборудованию городов и населённых пунктов системами водоподготовки для хозяйственно-питьевых целей являются важным инструментом, содействующим реализации программ устойчивого развития регионов РФ, где учитываются стоимость или соотношение риск-стоимость средств в зависимости от масштаба социума.
6. Реализация предложений для организации и структуры базы данных по источникам водоснабжения в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в ГИС будет способствовать нейтрализации негативно эволюционирующих факторов влияния на качество водоснабжения.
7. В качестве научно обоснованных предложений повышения качества питьевого водоснабжения следует принятие решений на уровне доктрины продовольственной безопасности, реализации программы «Чистая вода» и других программ о включении в юридические формы права каждого члена общества на обеспечение питьевой водой, соответствующей мировым стандартам качества.

#### Список публикаций по теме диссертации

- 1. Минина М.В. Инновационные технологии повышения качества питьевого водоснабжения урбанистических сообществ, Труды ЮФУ. -Таганрог, 2009.-с.71-75**
- 2. Минина М.В. Особенности экологического образования на Севере. В сб. РАГС при Президенте РФ «Российский Север: траектория и перспективы социального развития»//Под ред.Н.А. Волгина и В.Н.Пивненко.-М.: КНОРУС, 2006.-с.1141-1148**



3. **Минина М.В.** Применение логико-вероятностного метода при оценке качества питьевого водоснабжения урбанистических сообществ. Труды СПбГПУ, 2010 – принято в печать
4. **Минина М.В., Митько В.Б.** Экономическая целесообразность организации экологического мониторинга функционирования Северо-Европейского газопровода. Известия ТРТУ. Таганрог, 2006.-с.183-188.
5. **Минина М.В.** Выпускная работа слушателя Президентской программы переподготовки управленческих кадров «Продвижение на рынок Санкт-Петербурга систем питьевого водоснабжения, основанных на инновационных технологиях».- СПб, 2007.-63 с.
6. **Минина М.В.** Системы питьевого водоснабжения коллективного пользования, основанные на инновационных технологиях. Тезисы Межд. Конф. «День Балтийского моря».- СПб, 2008.-с.502-503.
7. **Минина М.В.** Перспективы северного градостроительства с учётом Мирового опыта. Труды Конгресса «Цели развития тысячелетия» и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов, т.2, СПб.: ПИФСОМ, 2009.-с.92-101.
8. **Минина М.В.** Внедрение инновационных технологий в системах очистки воды коллективного пользования. Труды Конгресса «Цели развития тысячелетия» и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов, т.2, СПб.: «Инсанта», 2008.-с.106-110.
9. **Минина М.В.** Инновационные технологии в системах очистки воды коллективного пользования. Труды всерос. Научн. Конф. «Безопасность в чрезвычайных ситуациях».-СПб.: изд СПбГПУ, 2009.-с.109-113.
10. Митько В.Б., **Минина М.В.** Прогнозирование рисков в системе реагирования на чрезвычайные ситуации. Труды сем. «Проблемы риска в техногенной и социальной сферах», СПб, 2004.-с.57-59.
11. Митько В.Б., **Минина М.В.** Факторы, определяющие Устойчивое развитие прибрежных регионов Балтийского моря. Тезисы межд. конф. «Международный день Балтийского моря», СПб, 2007.-с.502-504.