

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



ПЕТРОВА ДАРЬЯ ИВАНОВНА

**КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ**

Специальность 1.6.6 – Гидрогеология

Диссертация на соискание ученой степени  
Кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

к.г.-м.н. Королев Э. А.

Научный консультант:

д.ф.-м.н. Храмченков М.Г.

Казань – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	10
1.1. Оценка геоэкологического состояния природно-геологической среды как жизненно важная необходимость жизнедеятельности современного общества.....	10
1.2. Факторы, необходимые для построения комплексной оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани.....	14
1.2.1. Природные факторы.....	14
1.2.2. Техногенные факторы.....	18
<b>ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	25
<b>ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА КАЗАНИ</b> .....	30
3.1. Физико-географические условия.....	30
3.2. Геологическое строение.....	34
3.3. Гидрогеологические условия.....	41
3.4. Изотопно-гидрохимический анализ природных вод.....	44
<b>ГЛАВА 4. ВОЗДЕЙСТВИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ</b> .....	59
4.1. Типы природно-техногенных систем.....	59
4.2. Кластерный анализ состояния поверхностных вод.....	64
4.3. Выделение показателей в подземных водах города Казани, содержание которых не соответствует нормативным требованиям.....	70
<b>ГЛАВА 5. ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА</b>	75
5.1. Математические методы прогнозирования динамики техногенного загрязнения.....	75
5.1.2. Принцип расчета математической модели ARIMA.....	77
5.1.2.1. Анализ стационарности и сезонности.....	79

5.1.2.2. Определение параметров модели .....	82
5.2. Прогнозные карты химического состава подземных вод на основе ретроспективного анализа.....	84
<b>ГЛАВА 6. КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ.....</b>	<b>92</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>106</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>108</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>126</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>127</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>130</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Подземные воды являются ключевым природным ресурсом, поддерживающим социально-экономическое развитие городских агломераций. Антропогенное возмущение систем подземных вод заметно ускорилось в течение XX века в результате интенсификации промышленного производства, роста урбоэкосистемы, сети транспортных магистралей. Под воздействием техногенеза трансформация отдельных природных элементов осуществляется в геологическом отношении практически мгновенно и занимает временной период от первых секунд до сотен лет. Подобные процессы можно отнести к быстрым, и они определяют режим развития техногеосистемы. Одним из динамичных элементов геологического пространства является подземная гидросфера верхней части земной коры [1]. Усиливаются опасения по поводу устойчивости ресурсов, ухудшения качества природных вод и воздействие антропогенной деятельности на зависимые экосистемы. Важнейшей проблемой в XXI веке является обеспечение экологической безопасности городских территорий. Оценка природно-техногенных компонентов, содержащихся в подземных водах на территории города Казани, и определение тенденции дальнейшего изменения химического состава подземных вод имеют важное значение для установления процедур регулирования качества окружающей среды.

Комплексная геоэкологическая оценка риска загрязнения подземных вод позволяет учитывать разноплановые факторы, которые оказывают влияние на качество подземных вод, выявлять и ранжировать районы по напряженности геоэкологической ситуации. Принятый в данном исследовании подход предполагает группировку природных и техногенных факторов, изучаемых с целью пространственного анализа территории, с выделением наиболее уязвимых участков антропогенной нагрузки на подземную гидросферу. Многомерный комплексный подход позволит снизить влияние техногенных факторов на компоненты природной среды и обеспечит сбалансированное развитие исследуемой территории. Надлежащее

управление, оценка риска загрязнения и защита качества подземных вод имеют важное значение для устойчивого использования водных ресурсов.

Для применения вышеизложенных подходов в качестве объекта исследований был выбран город Казань, который является достаточно типичным урбанизированным городом Российской Федерации.

**Целью** данной работы является комплексная оценка риска загрязнения подземных вод на территории города Казани с использованием метода математического моделирования.

**Основные задачи исследования:**

1. Сбор, систематизация, анализ и обобщение данных по химическому составу природных вод на территории города Казани.

2. Выявление особенностей естественного геохимического облика природных вод исследуемой территории.

3. Определение показателей, превышающих установленные ПДК, в гидрогеологических комплексах, используемых в хозяйственно - питьевых и промышленных целях на территории города Казани.

4. Определение основных видов природно-техногенных систем и типов их потенциальной опасности для природных сред исследуемой территории.

5. Анализ данных по гидрохимии. Наблюдения за изменением основных ионов, содержащихся в подземных водах исследуемой территории, в ретроспективе лет.

6. Прогнозирование изменения качества пресных подземных вод на территории города Казани.

7. Разработка методики интегральной оценки риска загрязнения подземных вод на исследуемой территории с использованием геоинформационных технологий.

8. Выявление пространственной дифференциации интегральных показателей геоэкологической модели города Казани.

**Объектом научного исследования** являются подземные воды верхней части литосферы на территории города Казани.

**Предмет исследований** – природные и техногенные факторы, обуславливающие риск загрязнения подземных вод на территории города Казани.

**Научная новизна результатов работы заключается в следующем:**

На основе ретроспективного анализа подземных вод получены пространственно-временные долгосрочные прогнозные модели основных ионов, изменение концентрации которых происходит под влиянием природно-техногенных факторов.

На основе проведенного комплексного исследования риска загрязнения подземных вод автором предложена методика, позволяющая по наличию определенных факторов территориально выделять участки, где подземные воды подвержены загрязнению.

Впервые для исследуемой территории получены изотопные характеристики атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод.

**Фактический материал, методы исследований, личный вклад автора.** Исходными материалами при решении поставленных задач являлись результаты полевых работ и аналитических исследований, систематизированных в результате камеральной обработки, полученные лично автором в период с 2018 по 2022 год, в том числе использовались материалы исследований Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан. Также использовались данные геологических отчетов и архивных материалов за период с 1960 по 2022 год. Анализы выполнялись по стандартным методикам в аккредитованных лабораториях Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

Общее число обработанных нами архивных протоколов анализов показателей качества источников водоснабжения – 68. За годы исследований отобрано около 210 проб природных вод на стабильные изотопы ( $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ), 145 из них – атмосферные осадки. Измерение изотопного состава воды осуществлялось на изотопном масс-спектрометре Delta V Plus (Thermo Fisher

Scientific, Германия).

Поставленные задачи решены на основе широко применяемых в науке методов обработки статистической информации: анализ временного ряда, ARIMA – моделирование, регрессионные методы. Для пространственного геохимического анализа использовались современные ГИС – технологии («ArcGisMap»).

Автором сформулированы цели и задачи исследования, разработана методика, произведен сбор необходимой информации, осуществлены подготовка, обработка (в том числе с использованием статистических методов) и анализ полученных результатов, сформулированы и обоснованы выводы проведенного исследования.

Разработка фундаментальной научной проблемы осуществлялась за счет субсидии, выделенной Казанскому университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0671–2020–0048 государственного задания № 075–00216-20-05 от 04.06.2020 г. (часть II). Секция 1)).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. С помощью математико-статистического анализа и геоинформационных методов выявлена динамика изменения значений основных геохимических показателей качества питьевых подземных вод города Казани в пространстве и времени. В ближайшее десятилетие, в целом, ожидается тренд увеличения лимитируемых показателей качества подземных вод, так как в районе исследования, где расположены крупные техногенные объекты, есть предпосылки развития неблагоприятной гидрогеоэкологической ситуации.

2. Геоэкологическое районирование города Казани основано на интегральной оценке территории по совокупности природных и техногенных факторов с ранжированием их значимости в каждой точке расчётной сети, что позволяет оптимизировать природоохранную деятельность, планировать и осуществлять мероприятия по охране окружающей среды с учетом риска

загрязнения подземных вод.

3. В результате комплексной геоэкологической оценки риска загрязнения подземных вод на исследуемой территории установлено, что большая часть площади города (74%) характеризуется низкой и средней степенью риска. Подземные воды левобережья Волги и долины р. Казанки относятся к высокой и весьма высокой степени риска загрязнения.

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

Достоверность научных результатов обеспечивается применением современных теоретических и практических подходов к построению комплексной геоэкологической модели оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани. Обработан значительный объем фондового материала, проведен анализ исследований, выполненных в аккредитованных лабораториях. Результаты исследований докладывались автором на международных конференциях, а также публиковались в рецензируемых российских и зарубежных изданиях.

**Практическая значимость исследований.** Полученные результаты могут быть использованы организациями, занимающимися решением экологических и хозяйственно-питьевых проблем, при прогнозировании сроков возможных загрязнений водоносных горизонтов города Казани.

#### **Публикация и апробация работы.**

По теме диссертационных исследований автором опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 – индексирована в базе данных Scopus. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 5 научных форумах различного масштаба: Всероссийской молодежной геологической конференции памяти В. А. Глебовицкого (Санкт- Петербург, 2020), XXIII Всероссийском совещании по подземным водам востока России (Иркутск, 2021), XXIX Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 2021), XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Пермь, 2020), Международной молодежной конференции им. Н.А. Головкинского



(Казань, 2020).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка литературы. Работа содержит 37 рисунков, 23 таблицы, 4 приложения. Общий объем работы составляет 130 страниц, список литературы насчитывает 146 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность научному руководителю доценту к.г.-м.н. Э. А. Королеву и научному консультанту д.ф.-м.н. М. Г. Храмченкову за научные консультации и всестороннюю помощь на всех этапах выполнения работы. Автор благодарен доцентам М. А. Варфоломееву и Т. Р. Закирову, профессору Р. Х. Сунгатуллину, инженеру О. В. Луневой и Е. Н. Яббаровой за ценные советы и рекомендации.

# **ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **1.1. Оценка геоэкологического состояния природно-геологической среды как жизненно важная необходимость жизнедеятельности современного общества**

Подземные воды являются одним из наиболее ценных природных ресурсов, а защита и управление подземными водами жизненно важны для эволюции человечества и социально-экономического развития городов. Проблемы загрязнения подземных вод и изменения качества природной среды приобрели мировые масштабы и заставили многих ученых, работающих в смежных областях научных исследований, искать новые междисциплинарные подходы к их решению [20,132,99]. Первоочередной задачей при выработке эффективных защитных мероприятий по охране и защите подземных вод являются оценка риска и определение источников техногенного воздействия на окружающую среду [131,146].

Методы оценки защищенности как грунтовых, так и артезианских вод разрабатывались в России и за рубежом начиная с 60-х годов XX века. Оценка риска загрязнения подземных вод на основе природной уязвимости впервые была введена в 1960-х годах [99].

В 1969 году в США была разработана модель DRASTIC [97], в которой учитываются геологические, гидрологические и гидрогеологические факторы территории: проницаемость пород зоны аэрации, величина питания подземных вод, литология водоносных пород, глубина залегания подземных вод, литологический состав почв, рельеф местности. Впоследствии были предложены многочисленные модели для конкретных регионов: Московской [35], Ленинградской [136] областей и Центрально - Черноземного региона РФ [50].

В работах И. С. Копылова [43] анализ геоэкологического состояния природно-геологической среды осуществляется на основе эколого-гидрографического районирования (или «бассейнового» подхода). Числовой

рейтинг и вес рассмотренных факторов установлены с использованием анализа площадного распространения компонентов природной среды. Геоэкологическая оценка учитывает основные факторы геоэкологического состояния окружающей среды: литогенная основа, ландшафты, почвы, донные осадки, подземные воды, поверхностные воды и приповерхностная атмосфера.

Стоит отметить, что два понятия «риск» и «уязвимость» схожи между собой, но имеют и определенные различия. Согласно Дэвиду Фостеру [112], риск загрязнения подземных вод предполагает естественную уязвимость водоносного горизонта с учетом техногенной нагрузки, которая является результатом деятельности человека и оказывает неблагоприятное воздействие на подземные воды.

В настоящее время разработаны методические приемы с позиции интегрального подхода к оценке состояния природной среды, основанные на всестороннем изучении комплекса процессов. Методология Р.Х. Сунгатуллина [81] по оценке геологического пространства основана на взаимосвязи трех основных факторов: 1) природного; 2) природно-техногенного; 3) техногенного. Этот метод основан на всестороннем изучении комплекса факторов, которые рассматриваются как единая (геотехногенная) система, в которой природные и техногенные компоненты создают неразделимый поток веществ, информации и энергии.

В последние годы для оценки состояния природной среды используют данные медико-экологических исследований. В этом направлении работали ученые Воронежского университета С. А. Куролап [71,72], С. А. Епринцев [73,74,75], В. Н. Жердев [76,77], Т. И. Прожорина [78]. Они предложили использовать в интегральной оценке экологического состояния природной среды данные медико-геоэкологических исследований, анализ основных техногенных факторов, которые влияют на здоровье населения.

В зависимости от поставленной задачи используются различные критерии для создания интегральной модели на региональном уровне, с учетом главных проблем исследуемой территории.

Город Казань, имеющий тысячелетнюю историю, является крупным промышленным центром России, для которого вопросы геоэкологической безопасности подземных вод являются важным элементом стратегического развития. В настоящее время водоснабжение г. Казани практически полностью (более 80 %) осуществляется за счет поверхностных источников из Куйбышевского водохранилища. Однако в случае резкого повышения концентрации токсичных веществ в Куйбышевском водохранилище при возможных аварийных выбросах город лишится основного источника водоснабжения. Поэтому геоэкологическая оценка степени риска загрязнения подземных вод на исследуемой территории — одна из наиболее актуальных гидрогеологических, геоэкологических и социальных задач.

Основными факторами, влияющими на состояние подземных вод, являются природные условия исследуемой территории и техногенное воздействие на окружающую среду (рис 1.1).

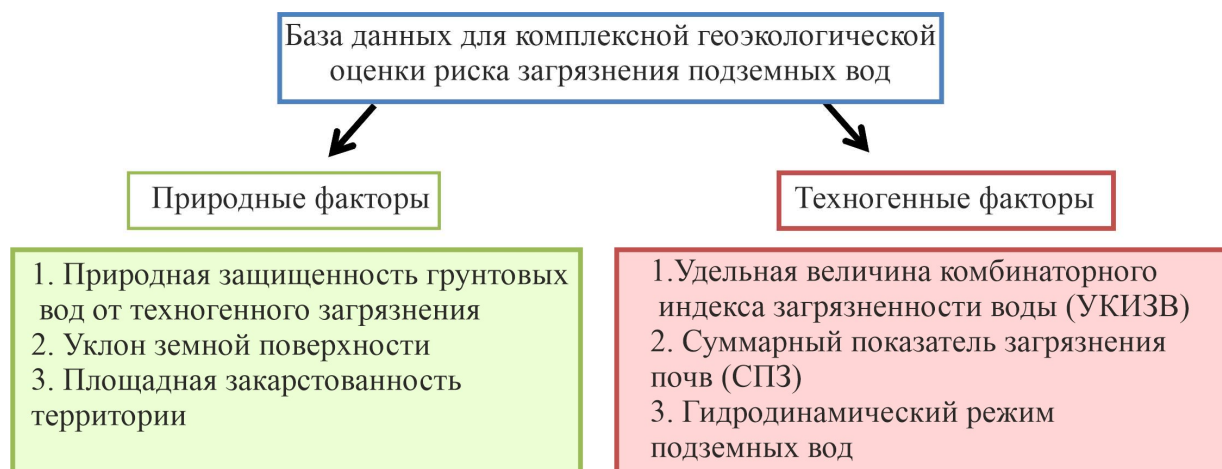


Рисунок 1.1. Основные факторы, влияющие на состояние подземных вод

Каждый фактор оценивался автором с помощью системы баллов, комплексная модель оценки риска загрязнения подземных вод осуществляется по среднему баллу. В результате предложено выделять четыре категории оценки риска загрязнения подземных вод: низкая, средняя, высокая и весьма высокая (табл.1.1).

Таблица 1.1. Критерии оценки состояния природной среды и ее компоненты

№	Фактор	Экологическая оценка (цифры в скобках – оценочный балл)			
		Защищенные (1)	Относительно защищенные (2)	Слабо защищенные (3)	Незащищенные (4)
1	Природная защищенность водоносного горизонта от техногенного загрязнения				
2	Уклон земной поверхности	7,1–9% (1)	5,1–7 % (2)	3,1–5 % (3)	0–3 % (4)
3	Площадная закарстованность территории	Слабая (1)	Средняя (2)	Сильная (3)	Очень сильная (4)
4	Удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ)	Условно чистые (1)	Слабо загрязненные (2)	Загрязненные (3)	Грязные (4) Очень грязные (5)
5	Суммарный показатель загрязнения почв (СПЗ)	Загрязнение отсутствует, либо очень низкое (1)	Низкая степень загрязнения (2)	Средняя степень загрязнения (3)	Высокая степень загрязнения (4)
6	Гидродинамический режим подземных вод	Ненарушенный (0)	Ненарушенный (0)	Нарушенный (1)	Нарушенный (1)
	Суммарная оценка риска загрязнения подземных вод	Низкий $\leq 7$	Средний (8–11)	Высокий (12–15)	Весьма высокий $\geq 16$

Районирование исследуемой территории по геоэкологической оценке риска загрязнения подземных вод строилось на основе растровых моделей в программе «ArcGisMap», которые характеризуются разделением географического пространства на ячейки-сетки со значениями, присваиваемыми каждой ячейке. Следовательно, несколько слоев техногенных и природных факторов необходимо представить в виде алгебры карт. Утилиты алгебры позволяют пользователю задавать математические отношения между слоями карты.

## **1.2. Факторы, необходимые для построения комплексной оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани**

### **1.2.1. Природные факторы.**

#### **Природная защищенность грунтовых вод от техногенного загрязнения**

Для построения модели геоэкологического риска загрязнения подземных вод важным аспектом является оценка природной защищенности подземных вод, которая помогает выявить участки территории, где наблюдается аккумуляция загрязняющего вещества. В настоящее время, в соответствии с действующим законодательством, защищенность месторождения подземных вод рассматривается из условий зон санитарной охраны (ЗСО), где рассчитывается время достижения загрязняющими веществами устья скважины [97]. Однако этот метод не обеспечивает рационального и надежного подхода к оценке риска загрязнения подземных вод исследуемого участка, так как защита направлена на источник (скважину), в то время как важным аспектом является защита всего водоносного горизонта.

На сегодняшний день оценке природной защищенности грунтовых вод значительное внимание уделено российскими учеными [8,10,33,43,96]. На протяжении десятилетий для региональной оценки условий природной защищенности подземных вод используется методика, предложенная В. М. Гольдбергом [98]. Она основана на четырех основных факторах: мощность и литологический состав пород зоны аэрации, фильтрационные свойства, глубина залегания целевого водоносного комплекса (горизонта). Условия природной защищенности подземных вод определяются с учетом индексов весов, диапазонов и классификации.

Для построения компьютерной модели защищенности подземных вод города Казани использовались данные из фондовых геологических отчетов по 104 водозаборным скважинам и 60 гидрогеологическим разрезам. Модель создана с помощью программного пакета «ArcGisMap» и включает 1609

балльных значений, что составляет в среднем 4 точки на 10 км<sup>2</sup>. Точечные данные преобразованы во взвешенные полигоны Тиссена: точка, обладающая наибольшим весом, имеет наиболее сильное влияние и пытается создать полигон большей площади, чем точка с меньшим весом. Кроме того, все водотоки на территории города получили балл 0 (незащищенные), что позволило создать геологически обоснованную компьютерную модель. Степень защищенности вод определялась по сумме баллов, учитывающей глубину залегания уровня вод четвертичного комплекса, состав и фильтрационные свойства пород, мощность слабопроницаемых отложений зоны аэрации.

Каждый параметр оценивался с использованием стандартизированной рейтинговой системы, а индексная карта представляет собой сумму рейтинговых карт. Ниже приведена схема для определения баллов и зависимости модели карты защищенности грунтовых вод от глубины уровня грунтовых вод, мощности зоны аэрации (глубина грунтовых вод) и литологии отложений (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Схема для определения баллов природной защищенности грунтовых вод

Н, м	Н≤10			10<Н≤20			20<Н≤30		
Баллы	1			2			3		
m <sub>0</sub> , м	m <sub>0</sub> ≤2			2<m <sub>0</sub> ≤4			4<m <sub>0</sub> ≤6		
ЛГ	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Баллы	1	1	2	2	3	4	3	4	6
m <sub>0</sub> , м	10<m <sub>0</sub> ≤12			12<m <sub>0</sub> ≤14			14<m <sub>0</sub> ≤16		
ЛГ	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Баллы	6	9	12	7	10	14	8	12	16
Примечание: ЛП- литологическая группа									

### Уклон земной поверхности

Уклон земной поверхности выступает в роли транспортной составляющей загрязнения грунтовых и может служить индикатором времени пребывания загрязняющего вещества на поверхности земли.

Значения уклона в % были получены из цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием инструмента «Slope», программного обеспечения «ArcGisMap». ЦМР изучаемой территории была создана с использованием изолиний на топографической карте масштаба 1:25 000 (рис.1.2). Вычисление значений производится путем расчета уклона между центром оцениваемой ячейки и центрами ее соседей.

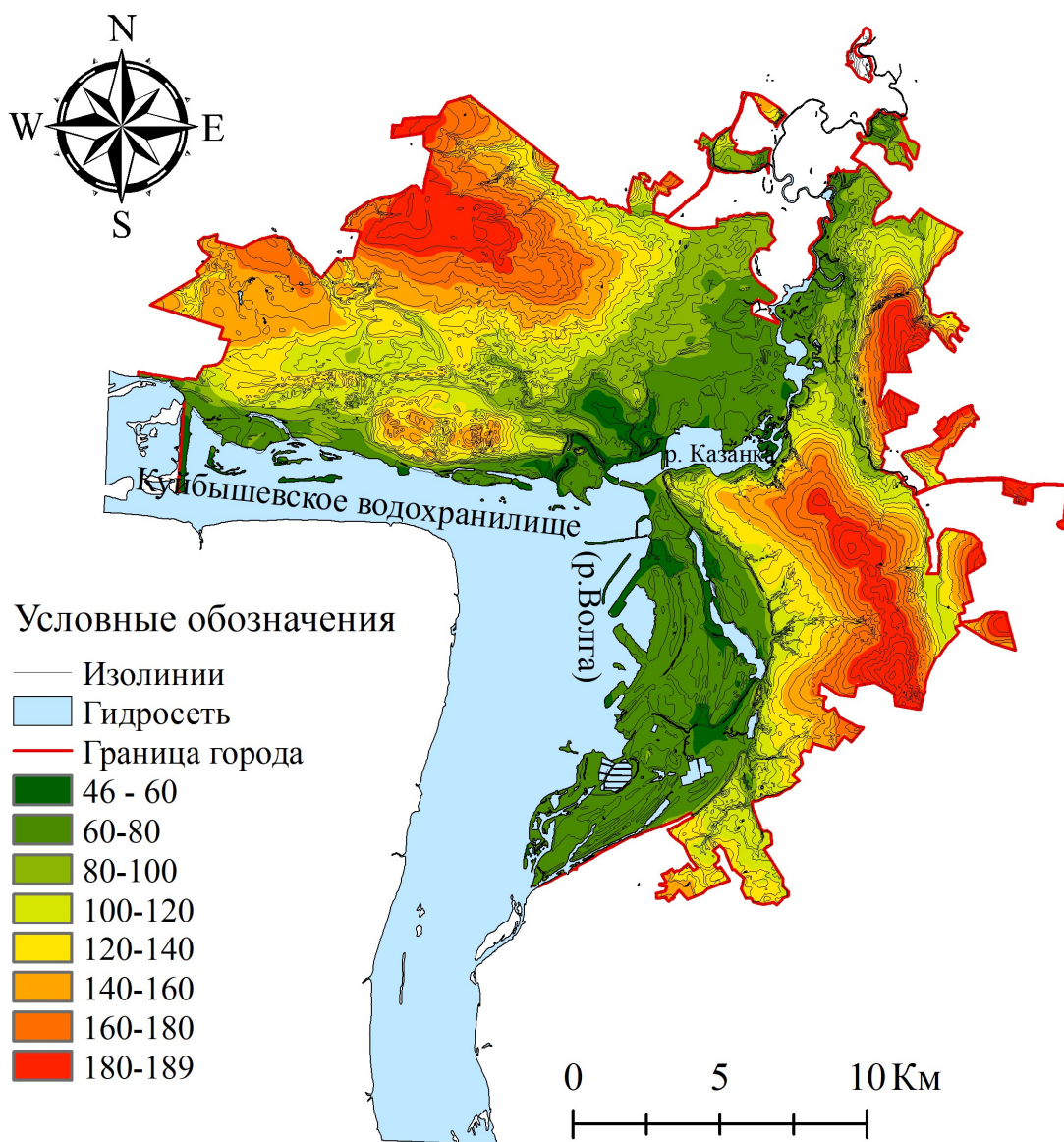


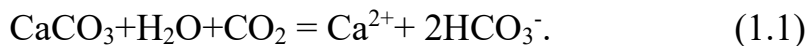
Рисунок.1.2. Цифровая модель рельефа города Казани

### Площадная закарстованность территории

Из экзогенных процессов, развитых на территории города Казани, наибольшее влияние на формирование состава подземных вод оказывает карстование карбонатных пород. С ним связано образование трещиновато-



карстовых водоносных горизонтов в отложениях казанского и сакмарского ярусов. Основным фактором развития карстового процесса является инфильтрация в карбонатные породы метеорных вод атмосферных осадков, обогащенных углекислым газом [110]:



В процессе взаимодействия с карбонатными породами инфильтрационные воды увеличивают емкостно-фильтрационные характеристики водовмещающих доломитов и известняков за счет формирования связанных между собой открытых трещин, каналов и пещер (рис.1.3). Высокопроницаемые дренажные системы карстовых районов особенно уязвимы в плане антропогенного воздействия. В областях развития карстовых процессов часто наблюдаются трансформации гидрохимических показателей водоносных горизонтов.

Изучением карстовых процессов города Казани и прилегающей территории занимались многие исследователи [80,22]. В работе Ф. А. Салиховой были обоснованы основные закономерности развития карстовых процессов на территории города Казани; отмечается, что ключевую роль в формировании карстовых процессов играют подземные воды [74].

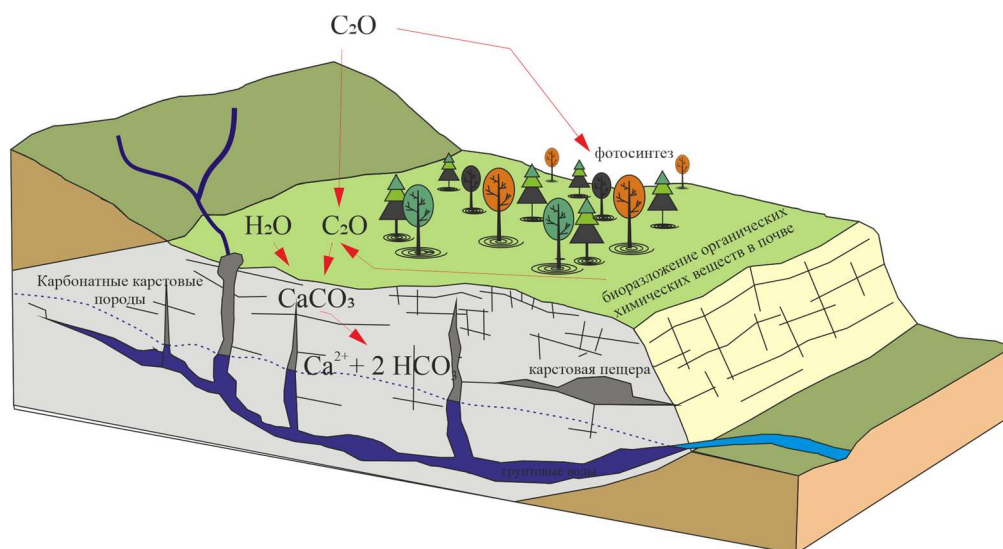


Рисунок.1.3. Схематическое изображение карстовой системы, ее природных ресурсов и соответствующих процессов

К. М. Мирзоев выделил на территории города Казани области с высокой, средней и низкой карстовой опасностью [56]. В своей работе автор проводит

анализ верхнепермских пород: чем меньше глубина залегания поверхности размыва верхнепермских пород, тем выше опасность.

Стоит отметить, что на территории города Казани организацией НПО ГУП «Геоцентр РТ» осуществляется мониторинг карстовых процессов [6].

Анализы карстовых процессов на территории города Казани, выполненные сотрудниками ГУП «Геоцентр РТ», были взяты за основу при составлении карты карстовых процессов на исследуемой территории.

Для оценки степени пораженности территории карстовыми процессами использовался коэффициент площадной закарстованности [53]:

$$K_s = S_b/S, \quad (1.2)$$

Где  $S_b$  суммарные площади ( $m^2$ ) карстовых процессов,  $S$  – площадь растровой ячейки, размером  $100 \times 100$  м.

### **1.2.2. Техногенные факторы**

Помимо природных факторов, которые обусловлены исключительно геологическими, гидрогеологическими условиями и процессами, на подземные воды большое внимание оказывает антропогенная нагрузка, которая включает в себя факторы, такие как удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды. (УКИЗВ), суммарный показатель загрязнения почвы (СПЗ), нарушенный гидродинамический режим подземных вод.

#### **Удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ)**

Автором из геологических отчетов и архивных материалов собраны результаты 450 зимних (ледостав), 239 весенних и 849 летне-осенних серий химических анализов поверхностных вод (Куйбышевское водохранилище, реки, озера, болота), выполненных в период с 2014 по 2020 год. Анализы выполнялись по стандартным методикам в рамках программы мониторинга, осуществляемого Министерством экологии и природных ресурсов Республики Татарстан.

Для расчета УКИЗВ было взято шестнадцать наиболее распространенных компонентов в поверхностных водах исследуемой территории для оценки степени загрязнения воды [72].

Анализировались данные по минерализации, хлоридам, сульфатам, соединениям марганца, никеля, цинка, меди, железа, нитратного, нитритного и аммонийного азота, анионные синтетические поверхностно-активные вещества (АСПАВ), по нефтепродуктам, фенольному индексу, химическому потреблению кислорода (ХПК), биологическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>).

В зависимости от величины УКИЗВ выделяют 5 классов качества поверхностных вод (табл.1.3).

Таблица 1.3. Классификация качества водотоков по УКИЗВ

Класс и разряд	Характеристика состояния загрязненности воды	УКИЗВ		
		Без учета числа КПЗ	В зависимости от числа учитываемых КПЗ	
			1	2
1	условно чистые	1	0,9	0,8
2	слабо загрязненные	(1; 2]	(0,9; 1,8]	(0,8; 1,6]
3	загрязненные	(2; 4]	(1,8; 3,6]	(1,6; 3,2]
Разряд «а»	загрязненные	(2; 3]	(1,8; 2,7]	(1,6; 2,4]
Разряд «б»	очень загрязненные	(3; 4]	(2,7; 3,6]	(2,4; 3,2]
4	грязные	(4; 11]	(3,6; 9,9]	(3,2; 8,8]
Разряд «а»	грязные	(4; 6]	(3,6; 5,4]	(3,2; 4,8]
Разряд «б»	грязные	(6; 8]	(5,4; 7,2]	(4,8; 6,4]
Разряд «в»	очень грязные	(8; 10]	(7,2; 9,0]	(6,4; 8,0]
Разряд «г»	очень грязные	(8; 11]	(9,0; 9,9]	(8,0; 8,8]
5	экстремально грязные	(11; ∞]	(9,9; ∞]	(8,8; ∞]

При оценке степени загрязненности поверхностных вод использованы значения ПДК вредных веществ для питьевого и культурно-бытового водопользования [18].

### **Суммарный показатель загрязнения почвы (СПЗ)**

Изучение степени загрязнения почв необходимый этап при оценке последствий антропогенной деятельности. Почва является связующим звеном между различными экосистемами, такими как биосфера, атмосфера и гидросфера. Почвенный слой обладает способностью записывать и сохранять

изменения, происходящие в окружающей среде. Понятие «память почвы» включает в себя взаимодействие геосферы и воздействие человека на наземные экосистемы [89]. Высокие уровни осаждения пыли в результате исторической антропогенной деятельности имели последствия для текущих и будущих почвенных условий [4]. Таким образом, почвы обладают основополагающим значением для сохранения качества окружающей среды на местном, региональном и мировом уровне.

Требования к качеству почвы населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий, зон санитарной охраны источников водоснабжения, территорий курортных зон и отдельных учреждений отражены в основном нормативном документе «Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве».

На практике используется несколько методов для количественной характеристики загрязнения почв. Один из наиболее новых подходов в области оценки антропогенного привноса – фактор обогащения (enrichment factor) [100]:

$$EF = \frac{[El]sample / [X]sample}{[El]crust / [X]crust}, \quad (1.3)$$

где El – оцениваемый тяжелый металл, X – элемент-индикатор, sample – концентрация данного элемента в почвенном образце, crust – концентрация данного элемента по фону/земной коре.

Чтобы установить фактор влияния антропогенного привноса тяжелых металлов Barbieri и др. [100,123,103,121,102,101] использовали более детальную градацию значений EF: (1)  $EF < 2$  соответствует отсутствию либо минимальному антропогенному привносу; (2)  $2 \leq EF < 5$  – средний привнос; (3)  $5 \leq EF < 20$  свидетельствует о значительном антропогенном привносе; (4)  $20 \leq EF < 40$  – очень высокий привнос; (5)  $EF > 40$  – экстремально высокий привнос. Фактор обогащения успешно применяется для оценки техногенного привноса [109]. Хотя ценность этого метода признана многими учеными, его

информативность теряется с ростом масштабов исследуемой территории и повышением гетерогенности геохимических условий. Установлено, что EF не учитывает естественную вариабельность концентраций элементов, связанную с биогеохимическими и локальными литогенными процессами [129.]

Особое значение для оценки качества почвы в отношении моноэлементного загрязнения тяжелыми металлами имеют фоновые показатели как индикаторы природных и техногенных процессов. Экологическую оценку почвенного загрязнения химическими веществами можно оценить с помощью коэффициента опасности:

$$K_0 = \frac{C_i}{\text{ПДК}}, \quad (1.4)$$

где  $C_i$  – содержание  $i$ -го загрязняющего вещества в почве территории за год (или период), мг/кг; ПДК– предельно допустимая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества в почве, мг/кг;

С помощью однофакторного индекса:

$$P_i = C_i/S_i, \quad (1.5)$$

где  $P_i$  – индекс загрязнения тяжелого метала  $i$ ;  $C_i$  – фактическое содержание  $i$ -го элемента;  $S_i$  – фоновое содержание  $i$ -го элемента.

Для оценки полиэлементного загрязнения используют сумму значений всех  $N$  однофакторных индексов загрязнения  $P_i$ . Этот простой опытный инструмент применяется для оценки суммарного загрязнения:

$$C_d = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (1.6)$$

Однако этот метод не включает процедуру количественной оценки для определения критических значений, т. е. для классификации по группам опасности загрязнения почвенного покрова [13,14].

В работе Likulu et al. (2013) использован модифицированный показатель суммарного загрязнения [122]:

$$mC_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_i. \quad (1.7)$$

Для данного показателя автором С. С. Рязановым [73] на примере Республики Татарстан предложена следующая классификация:  $mC_d \leq 1.5$  – загрязнение отсутствует либо очень низкое;  $1.5 \leq mC_d < 2$  – низкая степень загрязнения;  $2 \leq mC_d < 4$  – средняя степень загрязнения;  $4 \leq mC_d < 8$  – высокая степень загрязнения;  $8 \leq mC_d < 16$  – очень высокая степень загрязнения;  $16 \leq mC_d < 32$  – экстремальная степень загрязнения;  $32 \leq mC_d$  – ультравысокая степень загрязнения.

Таким образом, данная классификация по группам опасности загрязнения почвенного покрова является приоритетной для оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани.

### **Гидродинамический режим подземных вод**

Одним из факторов оценки геоэкологической безопасности подземных вод города Казани является гидродинамический режим подземных вод. По степени антропогенного влияния выделяют два типа режима: ненарушенный (естественный) и нарушенный (техногенный). Основным показателем степени нарушенности природной гидродинамической обстановки является положение уровня подземных вод. Нарушенный гидродинамический режим приводит к изменению химического состава подземных вод и появлению в больших количествах таких компонентов, которые не связаны с геологическими и гидрогеологическими условиями водоносного горизонта, а обусловлены взаимодействием водоносного горизонта с поверхностными загрязненными водами [117,120,124].

Так, сразу после создания Куйбышевского водохранилища в подземных водах четвертичных горизонтов города Казань значительно повысилось содержание хлорид-ионов, сульфат-ионов, ионов натрия и соединений азота [38]. Подобный факт объяснялся следующим образом: подпор со стороны водохранилища обусловил подтопление территории Казани (особенно

Приволжского района города) и попадание в зону подтопления многих выгребных ям как источников антропогенного загрязнения подземных вод.

Для контроля за состоянием подземных вод в подтапливаемой зоне была организована сеть гидрогеологических наблюдательных скважин, пробуренных в период с 1957 по 1999 год, заложенных преимущественно в виде створов, расположенных по нормали к береговой линии водохранилища, и охватывающих пределы первой и второй надпойменных террас с выходом на высокие террасы.

Оценка гидродинамического состояния подземных вод на территории города Казани выполнялась на основе результатов режимных наблюдений по 60 скважинам, в том числе: по 24 скважинам, входящим в состав опорной Государственной наблюдательной сети (ОГНС), 36 скважинам МУП «Водоканал». Помимо результатов режимных наблюдений по скважинам к построению карт привлекались данные ежедневных замеров по уровню Куйбышевского водохранилища (пост Верхний Услон) с сайта Информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России.

Режим подземных вод города Казани был отнесен к террасовому виду режима [31], формирующемуся в пределах террас крупных рек. Приходная часть баланса определяется инфильтрацией атмосферных осадков через зону аэрации подтоком со склонов и междуречий и разгрузкой межпластовых вод, расходная – за счет горизонтального стока и, в меньшей степени, за счет испарения. Здесь достаточно хорошо выражены сезонные колебания. Наиболее интенсивное питание подземных вод наблюдается в весенне-летний период, оно связано со снеготаянием и выражается наибольшими в течение года амплитудами подъема. К этому периоду приурочено наиболее высокое положение уровней. Подъем уровней связан также с осенними дождями, но амплитуды при этом подъеме в 2–3 раза меньше весенне-летних. Самый низкий уровень приурочен к концу зимнего периода. Таким образом, приходная часть баланса террасового вида режима формируется в весенний и

осенний периоды, расходование происходит в зимне-весенний и осенне-зимний периоды.



## ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Древние цивилизации в основном были сосредоточены вокруг крупных источников пресной воды. Наличие достаточного количества воды было основным фактором при выборе места расположения поселений. Качество воды имело второстепенное значение. Главными критериями при выборе питьевого источника были прозрачность воды, отсутствие у нее привкуса и запаха. Проблемы со здоровьем, связанные с плохим качеством воды, не вызывали беспокойства. Однако по мере роста городов, развития промышленности и транспорта все более обострялись проблемы со здоровьем населения, что вызвало повышенное внимание ученых к поиску и оценке качества подземных вод [18, 23,21].

В целом изучение гидрогеологических и геоэкологических особенностей на территории города Казани можно условно разделить на 5 этапов (табл.2.1).

Созданный в России еще в 1882 году при Министерстве государственных имуществ Геологический комитет во главе с Г. Гельмерсеном положил начало систематическим крупным гидрогеологическим работам на территории Советского Союза.

В конце XIX века этими исследованиями руководил С. Н. Никитин, признанный ныне одним из основоположников отечественной гидрогеологии. Он определял гидрогеологию как науку о «подземных водах, их происхождении, залегании, распределении, движении и весенний разряд».

В этот период учеными-геологами Казанского университета А. В. Нечаевым, П. И. Кротовым и А.А. Штукенбергом были проведены обширные исследования геолого-гидрогеологических условий на территории Казанской губернии.

Отделение треста «Гидроэнергопроект-Камстрой», а в дальнейшем Горьковская гидрогеологическая станция инициировали первые научные наблюдения за уровнем грунтовых вод в пределах Куйбышевской плотины в

начале 1930-х годов. Поводом для бурения наблюдательных скважин было проектирование мероприятий по защите от подтопления центральной части города Казани.

Широкий спектр исследований подземных вод в различных областях гидрогеологии был проведен до Великой Отечественной войны.

В период с 1941 по 1945 год исследования в области гидрогеологии были направлены на изыскание источников водоснабжения для крупных промышленных объектов, обследование районов, где располагались оборонные сооружения.

Во главе с академиком Ф.П. Саваренским на правобережье Волги проводились маршрутные геолого-гидрогеологические исследования. Ф.П. Саваренский был ведущей фигурой в российской гидрогеологии в 1940-е годы, автором многочисленных публикаций по оценке ресурсов подземных вод.

В послевоенные годы все силы направлены на восстановление страны и социально-экономическое развитие. Гидрогеологические исследования на время были приостановлены.

В 1954–1956 годах в связи с предстоящим сооружением Куйбышевского водохранилища были восстановлены режимные наблюдения за состоянием подземных вод. Создание Куйбышевского водохранилища охватывает период с 1955 по 1957 год. А уже с 1963 года наблюдения за уровнем грунтовых вод и их химическим составом приобрели систематический характер.

В 1960 году начались детальные гидрогеологические и геологические исследования.

В 1968 году вышел отчет М. Я. Тукмаковой «Изучение режима подземных вод в пределах крупных водозаборов города Казани».

В 1963–1968 годах наблюдательная режимная сеть была расширена за счет организации Васильевского и Лаишевского постов.

В 1967 году и 1981–1982 годах были организованы наблюдательные посты в районах действия крупных водозаборов: «Аки», «Танкодром» в городе

Казани и «Восточный» в городе Зеленодольске, использовавшихся в качестве централизованных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения населения. В 1985 году были начаты режимные наблюдения на водозаборе «Мирный», входящем в черту Казанской поисково-разведочной площади – перспективном источнике водоснабжения города.

В 1981 году вышел «Отчет-ежегодник по результатам изучения режима подземных вод на территории Татарской и Удмуртской АССР, выполненный Гидрогеологической режимной партией в 1980 г. (автор – В.Г. Отдельнов).

В последующие годы (1980–1987) расширение режимной сети проводилось как за счет бурения, так и за счет приемки скважин от съемочных и разведочных партий СВГРЭ, КазТИСИЗа, Гидрокоммунстроя.

Работы по изучению режима, баланса и состояния подземных вод на территории РТ ТРГПП «Татарстангеология» продолжались с 1987 по 2000 год. Результаты работ отражены в ежегодных отчетах «Изучение режима и баланса подземных вод, оценка их состояния на территории РТ».

С 2000 года полномочия по ведению государственного мониторинга подземных вод переданы ТНПЦ «Геомониторинг» и ГУП «НПО Геоцентр РТ».

Мониторинг включает такие вопросы, как описание климатических и геологических условий, данные о гидрохимии и температуре подземных вод, источники загрязнения подземных вод и их влияние на качество подземных вод, оценка подземных вод, потенциал, а также текущее и будущее использование и управление подземными водами.

В 2000 году под руководством В. И. Жарковой была завершена работа по паспортизации водозаборов и водозаборных скважин. Результатом этой работы является создание информационной базы государственного мониторинга подземных вод (ГМПВ) на действующих водозаборах РТ [13].

Высокая степень хозяйственного освоения территории, примыкающей к городу Казани по левобережью Куйбышевского водохранилища, слабая изученность влияния техногенной нагрузки на геологическую среду вызвали

в начале XXI века необходимость проведения здесь специальных геоэкологических исследований.

В 2007 году под руководством Д. А. Медведева была создана цифровая геоэкологическая карта Республики Татарстан масштаба 1:200000, на которой отображена оценка техногенной нагрузки на геологическую среду в соответствии с интенсивностью техногенного воздействия промышленных, энергетических, сельскохозяйственных, водохозяйственных, транспортно-коммуникационных объектов. Д. А. Медведевым оценено эколого-гидрогеологическое состояние города Казани, а также химический состав и качество подземных вод. Изучены эколого-геохимические условия, характеризующиеся распределением экологически опасных концентраций нормируемых компонентов в почвах, донных осадках водотоков и породах зоны аэрации. Разработаны предложения и рекомендации по рациональному и безопасному использованию недр.

Р. Х. Мухаметшину, Ю. П. Бубнову к 2010 году удалось организовать широкомасштабное исследование по экологической оценке состояния пресных подземных вод хозяйственно-питьевого назначения на территории города Казани и регионов Республики Татарстан. Проведена оценка распределения прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод применительно к водохозяйственным участкам и анализ их современного использования, оценка фактического объема отбора и использования подземных вод по водохозяйственным участкам.

Е. В. Осипова в 2014 году выявила последствия воздействия очагов загрязнения на примере полигона ТБО «Самосырово», осуществила оценку гидрохимического состояния подземных вод.

Анализ и обобщение материалов по химическому составу пресных подземных вод территории города Казани выполнялись неоднократно. Однако такие работы часто проводились без необходимого учета требований к питьевым водам, фрагментарно и без привлечения огромного накопленного

фактического материала и современных информационных методов обработки данных.

Таблица 2.1. Характеристика этапов гидрогеологической и геоэкологической изученности территории города Казани

Этап	Период	Ведущие исследователи и организации	Краткое содержание периода
1	Конец XIX века	А.А. Штукенберг, П. И. Кротов, А. В. Нечаев	Первые сведения о геологическом строении и гидрогеологических особенностях на территории Казанской губернии
2	С 1924 по 1941 год	М.Э. Ноинский, Л.И. Лось, В. В. Милославский, М.С. Кавеева	Бурение наблюдательных скважин с целью проектирования защитных мероприятий от подтопления Куйбышевской плотиной и связанные с этим наблюдения за режимом подземных вод
3	С 1941 по 1945 год	Ф.П. Саваренский, Т. Е. Григорьев, Э.А. Урасина	Изыскания источников водоснабжения для строящихся или передислоцированных промышленных предприятий, обследования районов оборонных сооружений
4	1960–1980 – е годы	М.Я. Тумакова ТРГГП «Татарстангеология»	Гидрогеологические исследования приобрели систематический характер. Вводятся мониторинг подземных вод, режимные наблюдения гидрогеологических скважин. Проводятся работы по охране подземных вод от истощения и загрязнения
5	С 1991 года по настоящее время	С. И. Поляков, Г. Э. Ершов, И. П. Волкова, Р.Х. Мухаметшина, ГУП НПО «Геоцентр Республики Татарстан»	Поиск месторождений пресных подземных вод на территории и города Казани и его окрестностях. Большое внимание уделяется геоэкологическим аспектам: изучение техногенного влияния на подземные и поверхностные воды. Создание цифровой гидрогеологической карты Республики Татарстан масштаба 1:200000

## **ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА КАЗАНИ**

### **3.1. Физико-географические условия**

**Общие сведения.** Казань является столицей Республики Татарстан (РТ) и одним из крупнейших научных, промышленных и культурных центров Российской Федерации (РФ). Территория города составляет 614,16 км<sup>2</sup>, а по численности населения Казань относится к крупнейшим городам России. В 2022 году число жителей составило 1259,2 тыс. человек при средней плотности населения 2,67 тыс. человек/км<sup>2</sup>. Город протянулся с севера на юг на 28 км, с запада на восток – на 30 км. Нижним течением реки Казанка (залив Куйбышевского водохранилища) город разделен на две части: более значительную по площади юго-восточную левобережную и северо-западную правобережную. В настоящее время в городе 7 административных районов: Авиастроительный, Вахитовский, Кировский, Московский, Ново-Савиновский, Советский и Приволжский.

**Современный рельеф.** В геоморфологическом отношении территория принадлежит к Кильмезской низине. В целом рельеф изучаемой территории представляет собой террасированную волнистую аккумулятивную равнину. Абсолютные отметки поверхности равнины на большей части территории варьируют от 100 до 130 м. Основная часть города расположена на двух террасовых уровнях: две низкие позднеплейстоценовые и две высокие среднеплейстоценовые надпойменные террасы, разделенные хорошо выраженным уступом высотой 20–25 м, делящим город на верхнюю и нижнюю части. Это разделение имеет не только геоморфологическое значение, но и социально-экономическое. Верхняя часть города во всех отношениях более благоустроенная и экологически более благоприятная.

Первая надпойменная терраса (осташковская) расположена на абсолютных отметках 51–53 м и в настоящее время находится ниже уровня Куйбышевского водохранилища. Поверхность второй надпойменной террасы

(микулинско-калининской) имеет абсолютные отметки 53–60 м. Расположена она в низинной части Приволжского, Вахитовского, Кировского районов и примыкает к Куйбышевскому водохранилищу; а также в прибрежной части нижнего течения реки Казанка, в пределах Ново–Савиновского и Советского районов. Абсолютные отметки поверхности третьей надпойменной террасы (одинцовско-московской) составляют от 60 до 75 м. Эта терраса резким ярко выраженным уступом поднимается над второй надпойменной и примыкает к четвертой лихвинско-днепровской, поверхность которой имеет абсолютные отметки 70–90 м. Четвертая терраса плавно переходит в пятую – окскую с абсолютными отметками поверхности свыше 90–100 и достигает 120 м. На поверхности одинцовско-московской террасы имеются дюнные гряды, воронки, озера, блюдцеобразные понижения.

В настоящее время, кроме природного рельефа, на урбанизированных территориях рассматривается и антропогенный (техногенный) рельеф. Существует даже новый термин «надстроенный рельеф», который определяется воображаемой поверхностью, созданной человеком в результате строительства зданий и сооружений. Например, средние значения относительных высот надстроенного рельефа города Казани составляют, по приблизительной, оценке 15–20 м. Изменение надстроенного рельефа влияет на изменение различных географических компонентов окружающей среды, а также на протекание природных процессов. Надстроенный рельеф оказывает влияние на многие гидрологические и гидрогеологические процессы, а также на грунты, находящиеся под зданием. Застройка города многоэтажными зданиями приводит к нарушению нормальных гидрологических процессов, что, в свою очередь, приводит к изменению режима грунтовых вод.

**Климат.** Район исследований расположен в зоне умеренно-континентального климата с теплым летом и умеренно холодной зимой. На протяжении XIX–XX столетий климатические условия Казани изменялись, отражая результат весьма сложных, нестационарных воздействий на городскую климатическую систему множества факторов разной физической

природы и разных (глобального, регионального и местного) пространственных масштабов. К группе чисто городских факторов относится рост инфраструктуры, в результате чего происходит изменение радиационного и теплового баланса.

Среднемноголетние (за последние 40 лет) годовые температуры атмосферного воздуха в Казани составили +4,10 °С. Необходимо отметить, что за 180-летний период наблюдений за температурой воздуха в городе Казани среднегодовая температура повысилась на 2,40 °С. При этом на долю «городской составляющей» (рост города, развитие его промышленного производства, энергетической и транспортной систем, изменения строительных технологий, свойств используемых строительных материалов и др.) приходится 1,40 °С, а остальная доля (около 1,00 °С) обусловлена действием естественных и глобальных антропогенных (выбросы в атмосферу активных газовых компонентов, аэрозоля) факторов. Подобное потепление климата привело к увеличению продолжительности безморозного периода. Средняя многолетняя продолжительность безморозного периода в Казани составляет 153 дня; причем присутствует хорошо выраженная многолетняя тенденция ее постепенного увеличения. Так, за последние 50 лет продолжительность безморозного периода увеличилась на 8,5 суток. Самым холодным месяцем года является январь, а самым теплым – июль. Например, среднемноголетние январские температуры атмосферного воздуха в Казани составляют -11,80 °С, а среднемноголетние июльские температуры атмосферного воздуха составляют +19,80 °С, при этом диапазон колебаний температуры воздуха за год может составлять 800 °С и более. Самое большое количество атмосферных осадков выпадает в июле, минимальное – в марте. За год выпадает 432–487 мм осадков, из них более 70 % приходится на теплый период. Устойчивый снежный покров образуется обычно в конце октября. Максимальная высота снежного покрова отмечается в конце февраля - начале марта (50-60 см). Средняя глубина промерзания почвы составляет 35,0–114,0 см. Среднегодовая величина относительной влажности воздуха 75%, её



максимум приходится на ноябрь - январь (86%), минимум - на май – июнь (63%). Среднегодовое испарение с поверхности суши составляет около 500 мм. Господствующим направлением ветра является южное; среднегодовая скорость ветра составляет 4–5 м/сек.

**Гидрография.** Основным гидрографическим объектом является река Волга, зарегулированная Куйбышевским водохранилищем с нормальным подпорным уровнем 53,0 м. Наполнение Куйбышевского водохранилища происходило с конца октября 1955 года по май 1957 года, при этом уровень реки Волга повысился на 11 м. Заполнение водохранилища вызвало подъем грунтовых вод в прибрежной полосе шириной до 5 и более километров, существенно изменив естественный режим реки Казанка, а также условия разгрузки подземных водоносных горизонтов. Под воздействием подпора изменились форма поверхности подземных вод, глубина залегания, скорость их движения. Например, величина подъема уровня грунтовых вод составила у плотины Куйбышевской ГЭС 15 м, в районе Казани – 2–9 м. В настоящее время режим подземных вод близок к стабилизации. Многолетними наблюдениями установлено, что в зоне влияния подпора происходит изменение ресурсов подземных вод, наблюдается перераспределение напоров в водоносных системах, развиваются экзогенные геологические процессы. Подъем грунтовых вод вызвал подтопление на территории Казани. Формирование подпора завершилось в 1963–1965 годах.

В настоящее время зона активного влияния водохранилища наблюдается в прибрежной полосе шириной 1,0–1,5 км. Наиболее сильное влияние водохранилища сказывается на четвертичных и пермских водоносных горизонтах, а в плиоценовом комплексе колебания уровня водохранилища отражаются слабо, что связывается с существенной разницей в емкостных свойствах водовмещающих пород в данных гидростратиграфических подразделениях. В годовом цикле колебаний уровня водохранилища выделяют три периода: весеннее наполнение, летне-осеннее относительно стабильное положение, осенне–зимняя сработка. Средняя продолжительность

этапа весеннего наполнения 72–76 суток, наибольшая – 144. Уровень воды нормальной предполоводной сработки к апрелю составляет 48,0 м. Средняя интенсивность роста уровня в период наполнения – 16–19 см/сут., среднее повышение к концу периода – 4,9–5,6 м. Годовая амплитуда изменения уровня в среднем составляет около 6 м.

Гидрологический режим поверхностных водотоков характеризуется отчетливо выраженным весенним половодьем, летне-осенней меженью и устойчивыми низкими уровнями в зимний период. Весеннее половодье начинается обычно в первых числах апреля и продолжается 12-30 дней, ледостав – в первую декаду ноября. Средняя продолжительность зимней межени составляет 160-180 дней.

### **3.2. Геологическое строение**

Изученная территория относится к восточной части Восточно-Европейской платформы и характеризуется типичным для платформ двухъярусным строением: интенсивно дислоцированные метаморфические породы архея, раннего и среднего протерозоя слагают ее кристаллический фундамент, а палеозойские (девонские, каменноугольные, пермские) и кайнозойские (неогеновые, четвертичные) отложения – ее осадочный чехол. Особенностью докембрийского фундамента является его дискретная делимость на сегменты, мегаблоки, макро-, мезо- и микроблоки. Осадочный чехол (плитный мегакомплекс) мощностью около 2 км плащеобразно облекает кристаллический фундамент. По формационным и структурным особенностям разреза плитный мегакомплекс расчленяется на 2 структурных этажа: девонско-пермский (палеозойский) и кайнозойский. На территории Казани сегодня имеют место колебательные движения, выявленные путем сличения данных повторных нивелирований. О современной тектонической активности территории свидетельствуют и три исторических землетрясения в районе Казани, учтенные федеральным кадастром. К природным тектоническим факторам, потенциально влияющим на геоэкологическую (сейсмическую)

обстановку Казани, относятся зоны трещиноватости и разуплотнения пород, сформированные в результате микроамплитудных подвижек, а также наиболее глубокие участки предплиоценовых эрозионно-речных врезов.

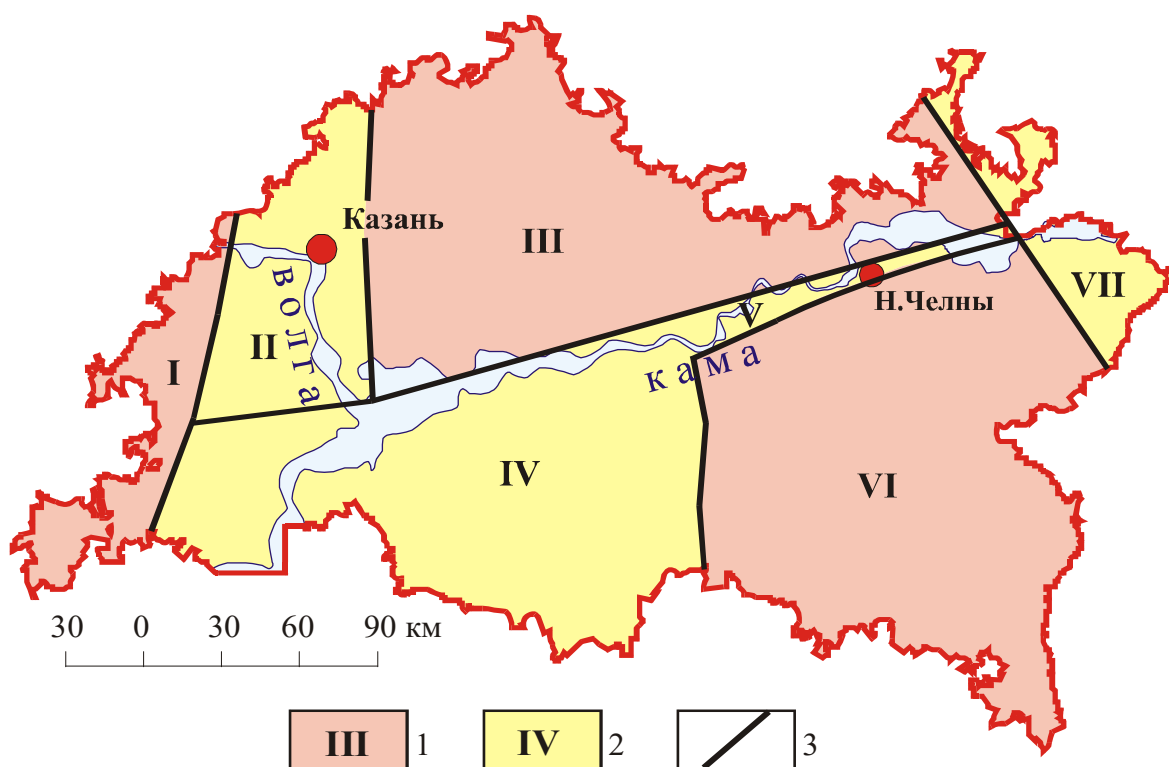


Рисунок 3.1. Схема тектонического районирования Республики Татарстан [85]. 1– положительные тектонические структуры (I– Токмовский свод, III – Северо–Татарский свод, VI – Южно-Татарский свод); 2 – отрицательные тектонические структуры (II – Казанско–Кировский прогиб, IV – Мелекесская впадина, V – Сарайлинский прогиб, VII – Верхне-Камская впадина); 3 – границы структур; 4 – линия разреза (см. рис. 3.2.)

В локальном тектоническом плане Казань расположена в пределах Казанско-Кировского прогиба, которому в фундаменте соответствует Казанско-Кажимский авлакоген (рис. 3.1). С запада Казанско-Кировский прогиб контактирует с Токмовским сводом, а с востока – с Северо-Татарским сводом. Это определяет и специфичность геологического строения Приказанского района. Например, здесь для пермского структурного плана характерно развитие синклинальной структуры – Казанской седловины (рис. 3.2), которая сегодня в гидрогеологическом отношении выражена аномальной зоной высокой дебитности родников и скважин (до 900 дм<sup>3</sup>/с), вскрывающих нижнепермские образования. В осевой (замковой) части синклинальной структуры, приходящейся на Приказанский район, в кайнозойскую эру

сформировались палео-, пра- и современные долины Волги, Казанки и их притоков. Это обусловило широкое развитие здесь аллювиального осадконакопления с формированием кайнозойских гидростратиграфических подразделений, которые теснейшим образом связаны с пермскими стратонами.

В геологическом строении территории города Казани в пределах интересующих нас глубин участвуют отложения пермской, неогеновой и четвертичной систем.

### **Пермская система (Р)**

#### **Нижний отдел (Р<sub>1</sub>)**

Нижнепермские отложения в пределах города Казани представлены породами сакмарского яруса, в составе которого выделяются два горизонта: тастубский и стерлитамакский.

Тастубский горизонт сложен доломитами, участками окремнелыми и загипсованными с прослоями известняков. Мощность горизонта составляет 23–31 м.

Стерлитамакский горизонт представлен доломитами, гипсами, ангидритами. Мощность горизонта 50–80 метров.

На территории исследований в настоящее время не зафиксированы породы, которые формировались в период с послесакмарского времени до начала казанского века. Предполагается, что в этот период времени здесь существовала наиболее приподнятая часть суши. Известно, что физическое и химическое выветривание приводит к разрушению горных пород, в процессе инфильтрации атмосферных осадков происходят интенсивная гидратация и выщелачивание пород. Особенно интенсивно подобным вторичным преобразованиям подвергаются сульфатные и карбонатные породы, образуются пустоты и каверны. Подобные высокопроницаемые коры выветривания приурочены, чаще всего, к стратиграфическим перерывам.

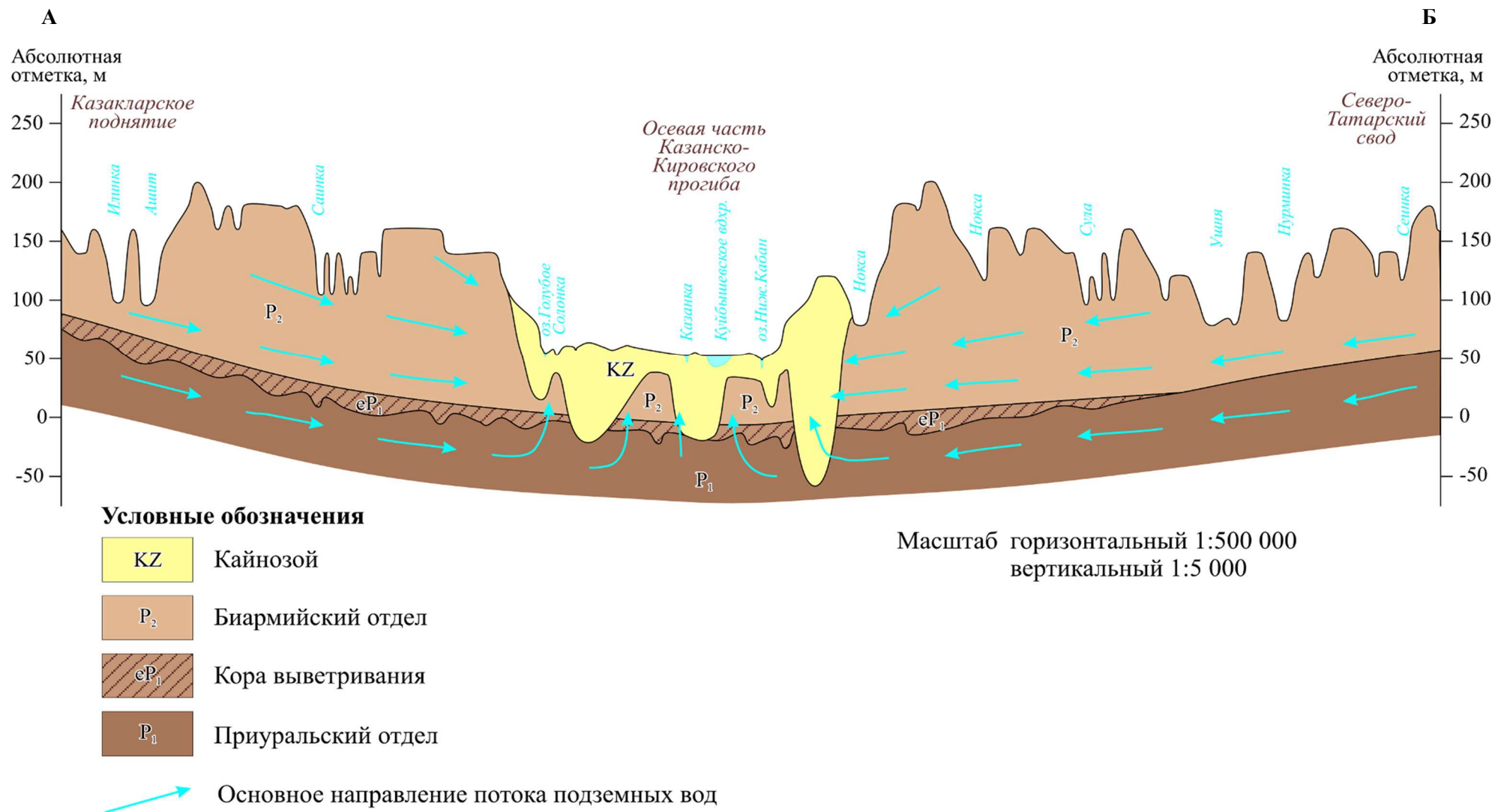


Рисунок 3.2. Принципиальная схема циркуляции подземных вод в пермских отложениях Приказанского района (линию разреза см. рис. 3.1)

На рассматриваемой территории подобный стратиграфический перерыв охватывает артинский, кунгурский и уфимский века общей продолжительностью 10 млн. лет [81].

Соответствующая ему приуральская кора выветривания отражена своеобразным вещественным составом пород: красновато-бурые брекчированные и трещиноватые породы, брекчии обрушения, щебень, доломитовая мука. Именно за счет растворения здесь сульфатно-карбонатных пермских пород (включая и отложения сакмарского яруса) подземными водами образовались воронки, впадины, понижения. Можно предположить, что интенсивное химическое выветривание способствовало максимальному выносу из зоны коры выветривания легкорастворимых солей кальция и магния с концентрацией здесь малоподвижных инертных химических элементов, в первую очередь – железа, марганца, алюминия и кремния. Таким образом, на границе приуральского и биармийского отделов пермской системы фиксируются резкие вторичные изменения пород, обусловленные процессами химического и физического выветриваний. Мощность коры выветривания изменяется от первых метров до первых десятков метров, а возможно и более. Местами кора выветривания полностью уничтожена в ходе последующих эрозионно-тектонических процессов.

На размытой закарстованной поверхности сакмарского яруса залегают среднепермские отложения:

Средний отдел ( $P_2$ ).

Средний отдел на территории города Казани представлен отложениями казанского яруса ( $P_2kz$ ).












Казанский ярус по литологическим и фаунистическим признакам подразделяется на два подъяруса: нижний и верхний.

Отложения нижнего подъяруса ( $P_2kz_1$ ) залегают на размытой поверхности сакмарского яруса. В его составе выделяются три осадочных ритма, каждый из которых начинается песчаниками, алевролитами, глинами, реже мергелями и заканчивается карбонатными породами. Общая мощность

нижеказанских отложений изменяется от 35 до 73 м.

### Условные обозначения

Водоносные комплексы:

	четвертичный аллювиальный		плиоценовый аллювиальный		верхнеказанский карбонатно-терригенный
	нижеказанский карбонатно-терригенный		сакмарский сульфатно-карбонатный		песок
	суглинок		глина		известняк
	доломит		техногенный грунт		

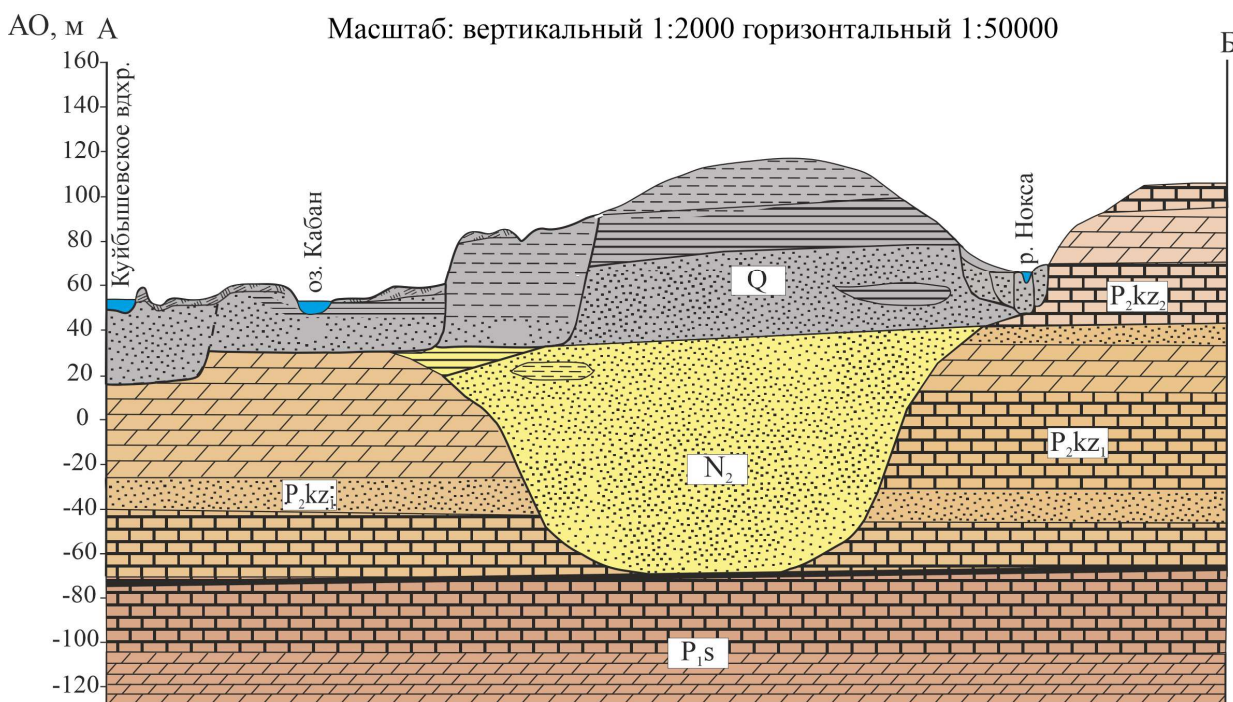
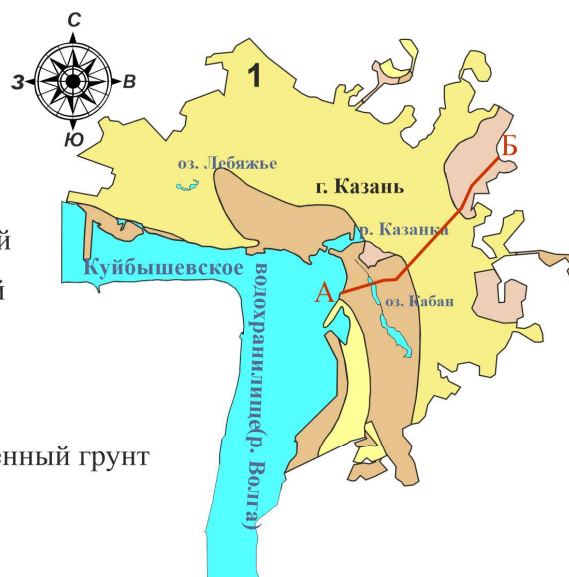


Рисунок 3.3. Геологическая карта и геологический разрез города Казани и прилегающей территории

Отложения верхнего подъяруса ( $P_2kz_2$ ) залегают на поверхности карбонатно-терригенных пород нижнего подъяруса. Сложены они карбонатными и терригенными породами. В кровле верхнего подъяруса породы трещиноваты, выщелочены и закарстованы.

**Кайнозой.** Широко развитые в районе Казани, как и на всей территории Республики Татарстан, кайнозойские образования включают осадки неогенового и четвертичного периодов.

### **Неогеновая система. Плиоцен (N<sub>2</sub>)**

Неогеновые отложения широко распространены и заполняют эрозионную сеть Палео-Волги и ее левых палеопритоков – Казанки и Мёши (рис. 3.3). Поверхность донеогеновых отложений имеет сложный характер и существенно осложнена останцами пермских пород. Ширина палеодолины Волги составляет 9–12 км, а ее тальвег прорезает на отдельных участках кровлю нижнепермских (ассельских и сакмарских) отложений.

### **Четвертичная система (Q)**

Образования четвертичного периода повсеместно распространены на территории Казани. Они покрывают пермские и неогеновые отложения и характеризуются значительным разнообразием, сложностью строения, большой пестротой фациального и литологического состава, изменчивостью мощностей. Формирование четвертичных образований определялось строением рельефа, составом подстилающих пород, характером новейших тектонических движений, а также климатическими особенностями (рис. 3.4). Наиболее широким возрастным диапазоном и самыми значительными мощностями обладают аллювиальные отложения.

Эоплейстоценовые отложения слагают речные террасы, склоны и плато выше урезом современных рек. Неоплейстоценовый подотдел четвертичной системы представлен всеми тремя звеньями: нижнее звено включает аллювиальные осадки продолины Волги; среднее звено слагает четвертую и третью надпойменные террасы Волги; верхнее звено включает аллювий и озерно-аллювиальные образования, слагающие первую и вторую надпойменные террасы Волги и ее притоков. Голоценовые аллювиальные отложения слагают пойменные террасы и русла большинства рек. Они представлены песками кварцевыми косослоистыми с прослоями супесей, суглинков, в нижней части – прослоями грубых песков и галечников.



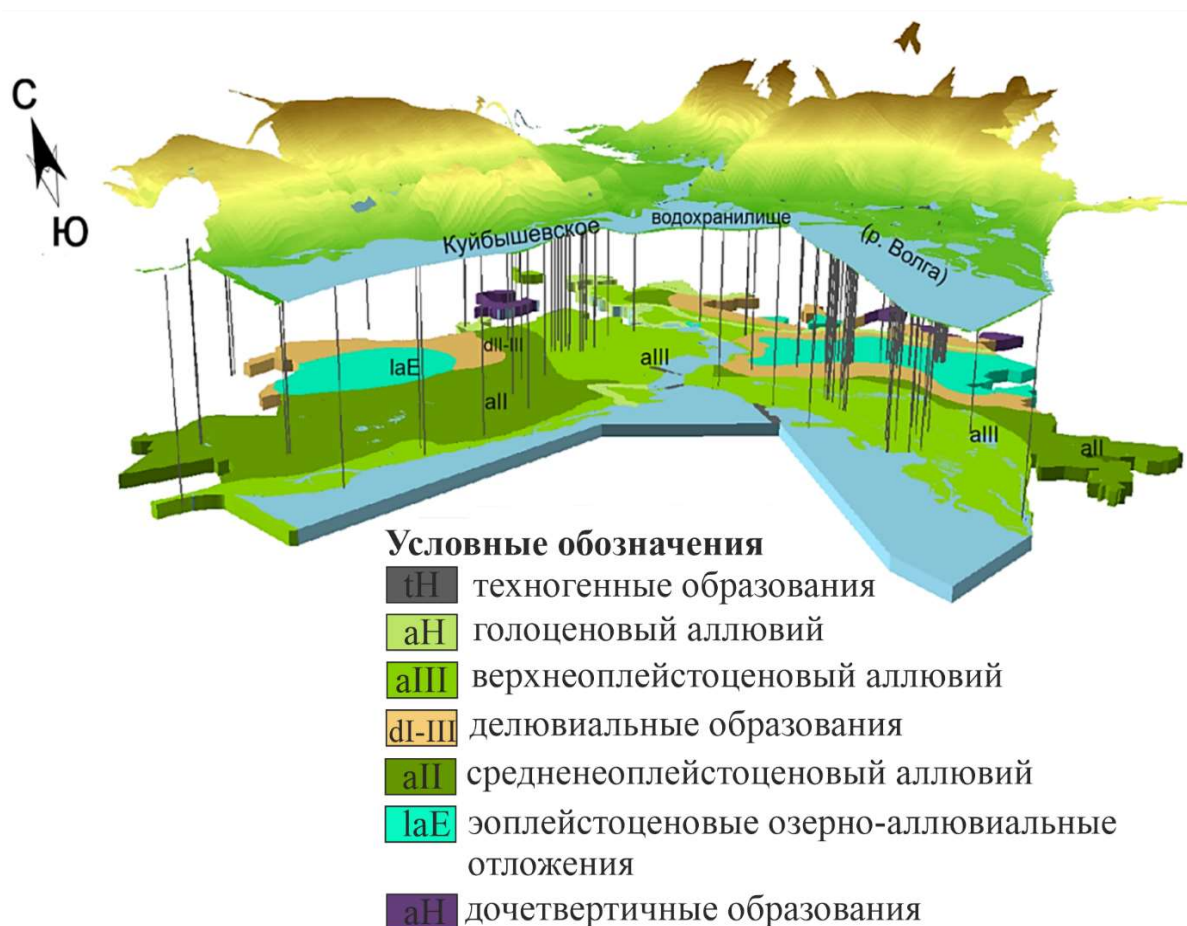


Рисунок 3.4. Современный рельеф и карта четвертичных образований города Казани (вертикальные линии – водозаборные скважины)

### 3.3. Гидрогеологические условия

Территория Казани расположена в пределах Камско-Вятского артезианского бассейна и включает следующие водоносные комплексы (сверху вниз): четвертичный аллювиальный комплекс (aQ); плиоценовый аллювиальный комплекс (aN<sub>2</sub>); нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс (P<sub>2</sub>kz<sub>1</sub>); сакмарский сульфатно-карбонатный комплекс (P<sub>1</sub>s).

Бассейн реки Волга сформировался в результате сложного взаимодействия тектонических, геоморфологических и климатических факторов за продолжительный (не менее 10 млн. лет) неоген-четвертичный период времени [16]. Поэтому в районе Казани основная часть ресурсов подземных и поверхностных вод приурочена к современной и палеодолине реки Волга. Неогеновые отложения широко распространены, они заполняют эрозионную сеть Палео-Волги и ее левых палеопритоков – Казанки и Мёши

(рис. 3.3). Поверхность донеогеновых отложений имеет сложный характер и существенно осложнена останцами пермских пород. Ширина палеодолины Волги составляет 9–12 км, а ее тальвег прорезает на отдельных участках кровлю нижнепермских (ассельских и сакмарских) отложений.

Подземные воды зоны активного водообмена распространены преимущественно в верхней части разреза осадочного чехла (до глубины 150–200 м) и включают водоносные горизонты в четвертичных, неогеновых и пермских отложениях. Гидрогеологические подразделения залегают выше и ниже эрозионных врезов рек Волга и Казанка, включая речной аллювий и палеоврезы. Движение единого потока подземных вод в зоне активного водообмена находится под дренирующим влиянием Волги, Казанки и Куйбышевского водохранилища.

***Водоносный четвертичный аллювиальный комплекс (Q).*** На эрозионной поверхности неогеновых отложений выше абсолютных отметок 60 м залегают четвертичные аллювиальные образования четвертой надпойменной террасы Волги. Общая мощность четвертичного аллювия колеблется от 1,6 до 16,3 м иногда достигая 32 м. В основании разреза террасы четвертичный аллювий представлен базальным слоем гравийно-галечных отложений мощностью несколько сантиметров. Выше по разрезу залегают преимущественно суглинки с прослоями глин и тонкозернистых песков.

В разрезе четвертичных отложений, представленных мелко- и среднезернистыми песками, часто встречаются прослой глинистых песков. Причем глинистость разреза возрастает к поверхности. Верхняя часть разреза с поверхности до глубины представлена супесью и суглинками пойменной фации аллювия. Аллювиальные отложения местами частично изолированы за счет глинистых прослоев, образующих локально замкнутые условия.

Коэффициенты водопроницаемости варьируют в широких пределах – от 60 до 221,0 м<sup>2</sup>/сут., что связано с изменчивостью мощности водовмещающих пород.

***Водоносный неогеновый терригенный комплекс (N<sub>2</sub>).*** Водоносный

неогеновый терригенный комплекс объединяет аллювиальные отложения Палео-Волги. Подошва комплекса фиксируется на абсолютных отметках от 35 м до -80 м; водовмещающими породами являются разномерные пески с включениями гравия и гальки, с прослоями и линзами глин. Залегающий на эрозионной поверхности пермских отложений неогеновый водоносный комплекс характеризуется весьма изменчивой мощностью: от 10 м над выступами палеозойских пород до 160 м в осевых частях палеоврезов. В связи со сложной фациальной изменчивостью аллювия и с разной мощностью комплекса водоносные челнинский, сокольский, чистопольский, биклянский горизонты в его составе не имеют сплошного развития и характеризуются широким диапазоном водообильности. Так, удельные дебиты скважин изменяются от 0,03 до 16,0  $\text{дм}^3/\text{с}$ , а коэффициенты фильтрации – от 1 до 60 м/сут.

***Водоносный верхнеказанский карбонатно-терригенный комплекс ( $P_2kz_2$ ).*** Повсеместно перекрытые четвертичным аллювием и частично неогеновыми отложениями породы верхнеказанского подъяруса в верхней части разреза представлены карбонатно-терригенными отложениями: трещиноватыми мергелями, песчаниками, закарстованными известняками и доломитами. В подошве свиты иногда залегают слабопроницаемые глины мощностью 6–8 м.

Мощность водоносной толщи в среднем составляет от 40 до 45 м. Водообильность отложений различная, удельные дебиты скважин колеблются от 0,2 до 5,0  $\text{дм}^3/\text{с}$ , водопроводимость — от 130 до 800  $\text{м}^2/\text{сут}$ .

***Водоносный нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс ( $P_2kz_1$ ).*** В пределах рассматриваемой территории развит повсеместно, исключая палеодолину, где он размыт. Комплекс приурочен к нижнеказанскому подъярусу казанского яруса средней перми. Основными отложениями комплекса верхней части являются известняки, реже доломиты, часто разрушенные до состояния щебня и доломитовой муки, присутствуют трещиноватые песчаники и закарстованные мергели. В нижней части

гидрогеологического комплекса залегает пачка слабопроницаемых алевролитов с прослоями слабоизвестковистых мергелей.

Комплекс характеризуется высокими фильтрационными свойствами, удельные дебиты скважин 3,0–6,0  $\text{дм}^3/\text{с}$ .

#### ***Водоносный сакмарский сульфатно-карбонатный комплекс (P1s).***

Водоносные сульфатно-карбонатные породы образуют выдержанный водоносный горизонт, мощность которого достигает 80 м. Литологически комплекс представлен в основном отложениями морских фаций: сильно закарстованными, участками, разрушенными до щебня и доломитовой муки, гипсами, ангидритами.

По гидравлическим особенностям подземные воды рассматриваемого гидрогеологического комплекса напорные, высота напора составляет от 72,8 до 129,1 м. Удельные дебиты скважин варьируют от 0,09 до 8,2  $\text{дм}^3/\text{с}$ .

Питание комплекса происходит в основном за пределами изучаемого района, по-видимому – на участках максимального гипсометрического залегания кровли сакмарских отложений, за счет перетекания из вышележащего нижеказанского комплекса. Разгрузка высоконапорных вод зафиксирована на участках относительного погружения водовмещающих сакмарских отложений как в перекрывающие их водопроницаемые нижеказанские отложения, так и в аллювиальные глинисто-песчаные образования четвертичного и неогенового водоносного комплекса в переуглубленных участках палеодолины.

### **3.4. Изотопно-гидрохимический анализ природных вод**

Высокие концентрации растворенных химических соединений, превышающие ПДК, могут отражать природные факторы: литологические, геохимические и гидрогеологические особенности исследуемой территории. Естественные фоновые значения являются основой для надлежащего плана управления подземными водами, особенно когда концентрации целевых химических веществ естественным образом превышают нормативные

пределы. Характеристика качества подземных вод, которая имеет основополагающее значение для поддержки устойчивого управления подземными водами, опирается на надежную оценку гидрогеологической и гидрогеохимической составляющих исследуемых водоносных горизонтов. Для выявления территорий с увеличивающейся техногенной нагрузкой необходимо определить природные процессы, которые влияют на геохимические показатели природных вод. Оценка естественного состояния исследуемой территории позволит определить фоновые значения анализируемых оценочных критериев.

Стабильные изотопы кислорода и водорода ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^1\text{H}$  и  $^2\text{H}$  или D) и их соотношения (чаще всего D/H или  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) широко применяются для изучения происхождения подземных вод, оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод, а также в качестве климатологических индикаторов условий формирования поверхностных вод [93, 89, 84, 85, 86, 83, 79, 90, 82]. В большинстве случаев более легкие изотопы ( $^1\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) испаряются с большей вероятностью в газовую фазу, в то время как более тяжелые изотопы (D и  $^{18}\text{O}$ ) склонны конденсироваться в жидкую или твердую фазы. Методы с использованием стабильных изотопов являются одними из самых точных и надежных методов исследования воды.

Пробы воды отбирались из поверхностных водных объектов, а также подземных вод (МУП «Водоканал», Казань). Пробы атмосферных осадков для построения локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) отбирались ежемесячно. Перед отбором посуду несколько раз ополаскивали исследуемой водой, после чего наполняли и закрывали. Для анализа изотопного состава легких элементов ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) пробы воды помещались в полимерную посуду объемом 10 мл с пластиковой крышкой. Всего за период с 15 июля 2019 года по 28 февраля 2022 года было отобрано 37 проб речных и подземных вод, 156 проб – атмосферных вод. Место отбора проб речных и грунтовых вод показано на рис. 3.5.

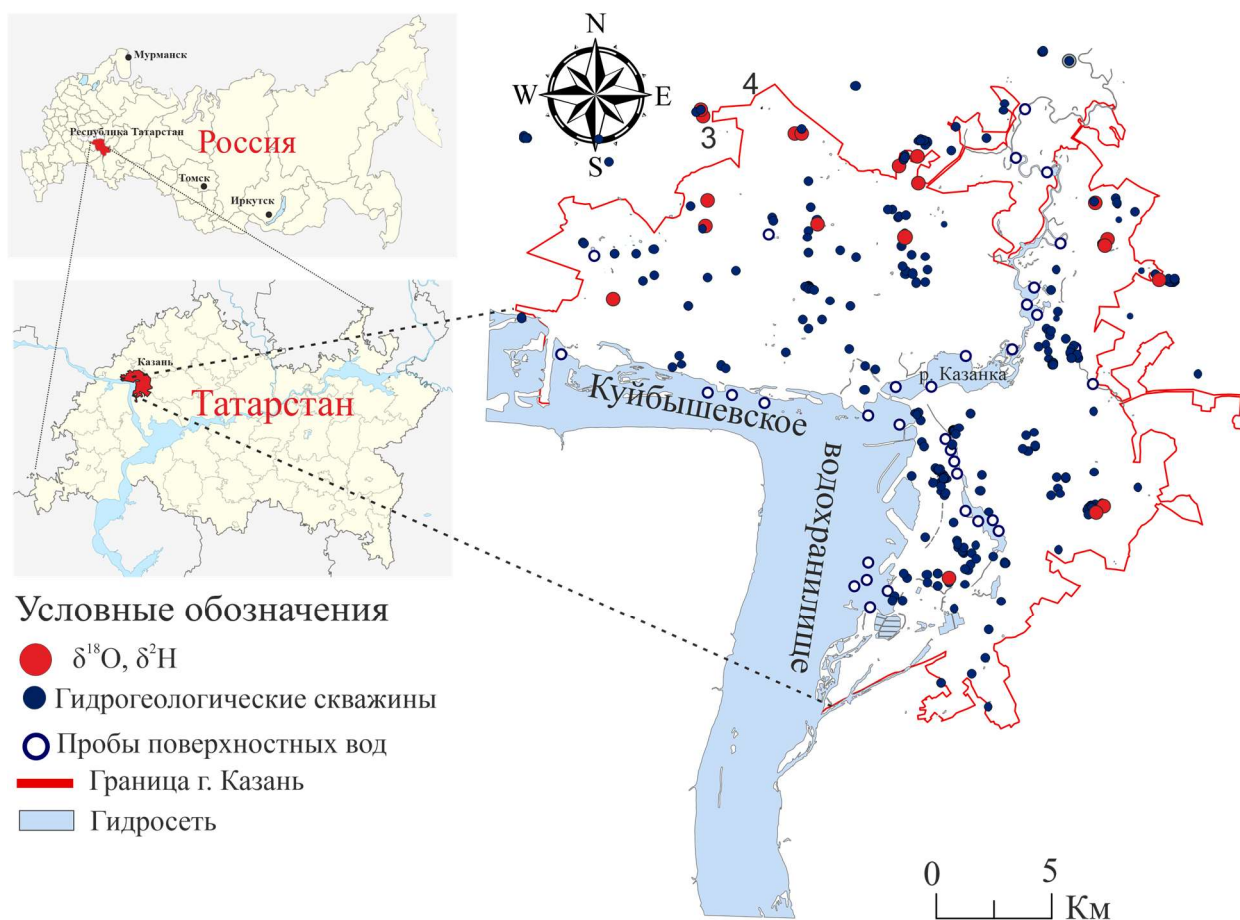


Рисунок 3.5. Карта–схема места отбора проб: г. Казань, Республика Татарстан, Россия; точка – скважины

Изотопное отношение кислорода и водорода в природных метеорных водах фиксируется глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ) [91]. Изменения изотопного состава в целом представляют собой зависимость пространственных факторов (широтных, континентальных, высотных и сезонных эффектов). ГЛМВ широко используется в качестве базовой линии в геохимии окружающей среды. Наиболее обедненные изотопные значения наблюдаются в полярных осадках, которые формируются из холодных воздушных масс, а также сезонные максимумы и минимумы наблюдаются в прибрежных районах [114,93].

Линия метеорных вод, рассчитанная для данной области, называется локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ) и имеет практическую ценность в качестве гидрологической основы для интерпретации отношений изотопов, измеренных в подземных водах.

Атмосферные осадки являются жизненно важным этапом в

естественном круговороте воды. Прямое и значительное влияние на формирование состава подземных вод оказывают атмосферные осадки, поэтому исследование стабильных изотопов на локальном уровне представляет ценную информацию для понимания генезиса геохимического облика поверхностных и подземных вод на исследуемой территории. На значения изотопного состава атмосферных осадков  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{D}$  влияют как географические, так и климатические факторы (абсолютные отметки местности, температура воздуха, количество осадков и т. д.).

Изотопы  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  в ежемесячных пробах осадков используются в качестве исходных данных для определения локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ). Обычный линейный регрессионный анализ был выполнен для 145 проб осадков (рис.3.6). Формула ЛЛМВ для города Казани имеет следующий вид:

$$\delta\text{D} = 7,7 \delta^{18}\text{O} + 5,5; \quad (5)$$

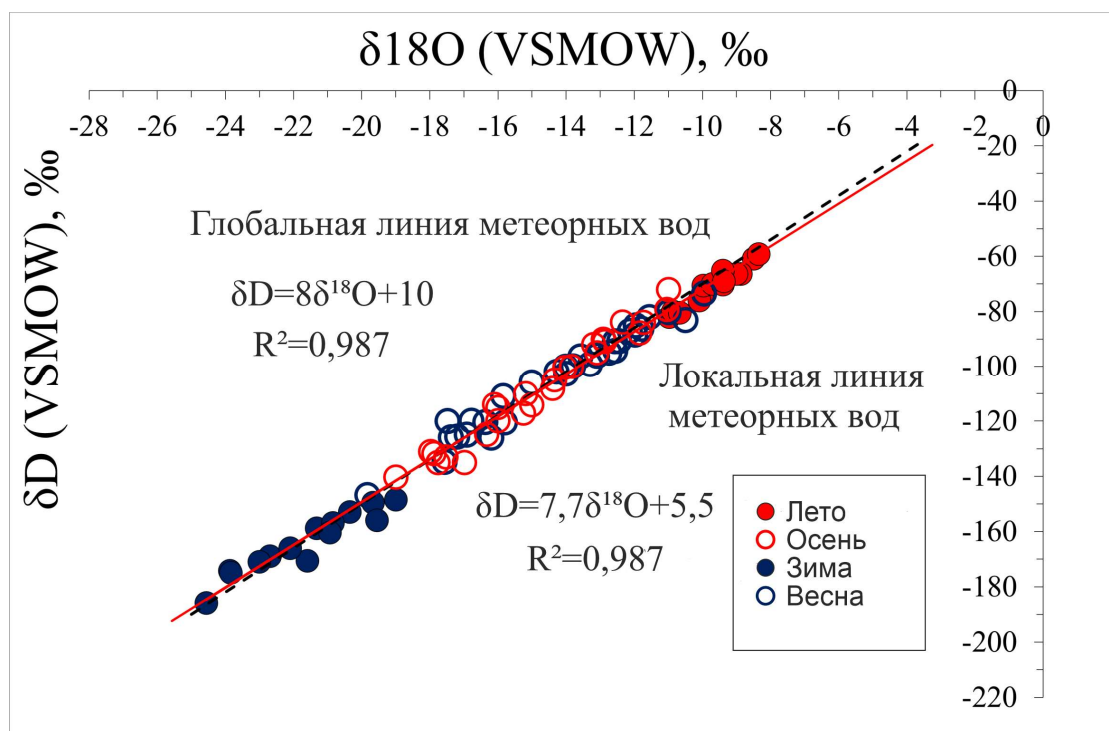


Рисунок 3.6. Локальная линия метеорных вод для города Казани

Изотопный состав кислорода и водорода в местных атмосферных осадках формирует первичные исходные данные при объяснении источников, времени удерживания и циркуляции подземных вод, а также степени взаимодействия вода-порода.

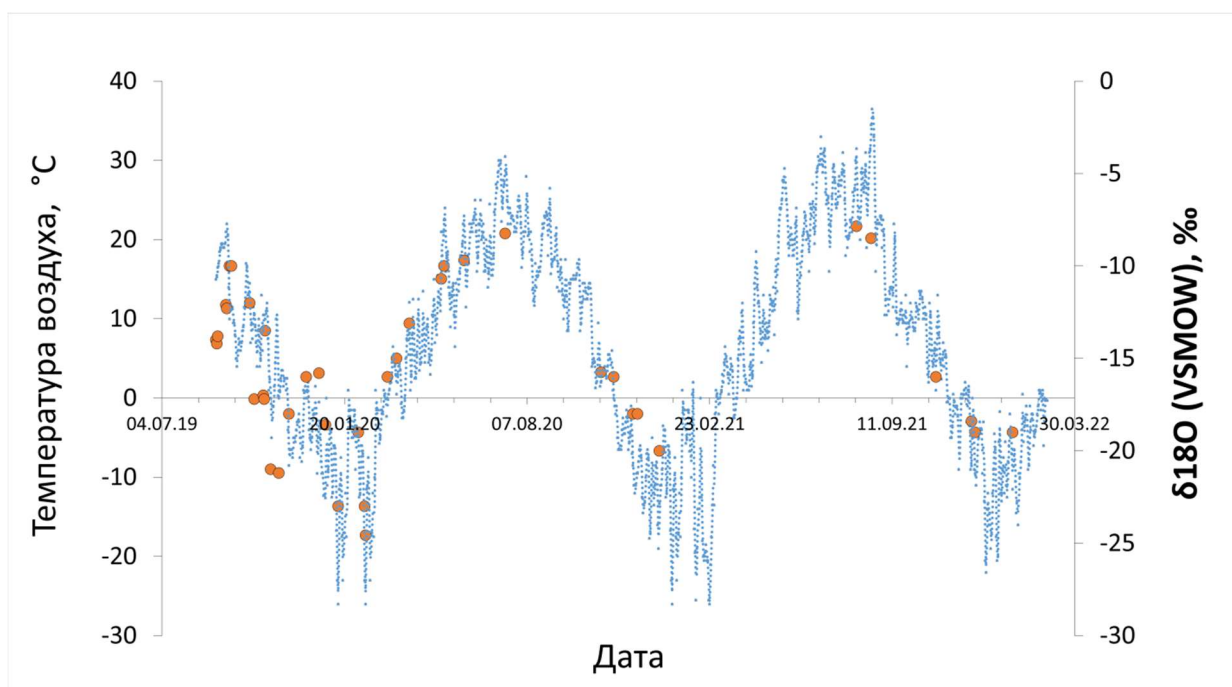


Рисунок 3.7. Температура воздуха в Казани вместе со значениями  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках в период отбора проб с октября 2019 года по февраль 2022 года. Синие маленькие точки показывают среднесуточные температуры воздуха, а большие оранжевые точки – значения  $\delta^{18}\text{O}$

Доминирующим фактором, контролирующим изотопный состав является температура воздуха исследуемой местности. На рисунке 3.7 видна значительная корреляция двух показателей. Стабильные изотопы воды ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{D}$ ) подвержены влиянию метеорологических процессов, которые обеспечивают характерный «отпечаток пальца» их происхождения, что важно для определения генезиса подземных вод.

Значения  $\delta^2\text{H}$  варьировались от  $-150,3$  до  $-78,2$  ‰,  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-19,4$  до  $-12,1$ ‰ соответственно (табл. 3.1). Самые высокие значения стабильных изотопов обычно измеряются весной и летом, самые низкие значения отмечаются в осенне-зимний период.

На рис. 3.7 отмечено, что ЛЛМВ отклоняется от ГЛМВ вправо как по наклону, так и по точке пересечения линейной регрессии на графике изотопов  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ . Такое отклонение в значительной степени свидетельствует о недостаточном увлажнении территории атмосферными осадками [119,128].



Таблица 3.1. Химический и изотопный состав атмосферных осадков на территории города Казани

Показатель, единица измерения	Сезон			
	Лето	Осень	Зима	Весна
Химический состав (мг/дм <sup>3</sup> )				
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	9,11	8,8	6,42	7,73
Сульфаты (SO <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	8,87	5,3	7,28	10,9
Хлориды (Cl), мг/дм <sup>3</sup>	3,9	3,7	2,3	5,2
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	4,3	3,28	2,1	4,8
Нитриты (NO <sub>2</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	0,3	0,3	0,1	0,3
Кальций (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	4,0	3,2	2,4	5,7
Магний (Mg), мг/дм <sup>3</sup>	1,1	0,91	0,1	0,94
Натрий (Na), мг/дм <sup>3</sup>	1,9	1,7	2,4	2,5
Калий (K), мг/дм <sup>3</sup>	1,3	0,9	0,69	1,5
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	35,9	28,5	0,7	40,4
pH, ед. pH	6,3	6,3	0,3	5,5
Химический тип воды	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Ca -Cl	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Ca -Cl	SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Ca - Cl	SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Ca -Cl
Изотопный состав (‰)				
δ <sup>18</sup> O	-13,9	-11,1	-19,4	-12,1
δ <sup>2</sup> H	-78,2	-94,5	-150,3	-104,3

Площадь Казани составляет 614,16 км<sup>2</sup>, из них 72,25 км<sup>2</sup> (8,5%) приходится на поверхностные водоемы (реки, озера, болота). Река Казанка (левый приток Волги) имеет следующие притоки: Солонка, Сухая река, Киндерка, Нокса. В настоящее время более 80 % водоснабжения Казани осуществляется из поверхностного источника – Волжского водозабора на берегу Куйбышевского водохранилища.

На территории города Казани и прилегающих территорий расположено несколько сотен озер. Основная их часть находится на террасах Волги. К западу от Казани на поверхности высокой террасы имеются многочисленные междюнные озера, наиболее известным из которых является озеро Лебяжье. К крупнейшему поверхностному водоему относится система озер Кабан, которая состоит из трех котловин: Нижний Кабан, Средний Кабан и Верхний

Кабан.

Заболоченность территории в среднем составляет не более 1%. Часть болот возникла при зарастании озер.

Таблица 3.2. Химический тип вод и изотопный состав поверхностных вод на территории города Казани

Название водного объекта	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta^2\text{H}$ , ‰	Гидрохимический состав вод по формуле Курлова	Тип воды
Куйбышевское водохранилище (р.Волга)	-9.96	-78.4	$M_{2,65} = \frac{\text{HCO}_{52}^3 \text{SO}_{24}^4 [\text{Cl}_7]}{\text{Ca}_{53} \text{Mg}_{42}}$	Сульфатно-гидрокарбонатная магниево-кальциевая, пресная
Река Казанка	-13.1	-96.0	$M_{0,5} = \frac{\text{HCO}_{29}^3 \text{SO}_{26}^4 [\text{Cl}_7]}{\text{Ca}_{57} \text{Mg}_{26} \text{Na}_{16}}$	Сульфатно-гидрокарбонатная натриево-магниево-кальциевая, пресная
Река Солонка	-12.5	-94.26	$M_{1,13} = \frac{\text{SO}_{65}^4 \text{HCO}_{27}^3}{\text{Ca}_{77} \text{Mg}_{19}}$	Гидрокарбонатно-сульфатная магниево-кальциевая, слабосолоноватая
Озеро Лебяжье	-5.92	-61.95	$M_{0,16} = \frac{\text{HCO}_{46}^3 \text{SO}_{17}^4 \text{Cl}_{15}}{\text{Ca}_{54} \text{Na}_{26} \text{Mg}_{19}}$	Хлоридно-гидрокарбонатная магниево-натриево-кальциевая, пресная
Озеро Кабан	-11.0	-86.18	$M_{1,1} = \frac{\text{SO}_{44}^4 \text{HCO}_{36}^3 \text{Cl}_{16}}{\text{Ca}_{55} \text{Mg}_{26} \text{Na}_{19}}$	Хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатная натриево- магниево-кальциевая, слабосолоноватая
Озеро Ковалевское	-10.5	-87.0	$M_{0,05} = \frac{\text{HCO}_{67}^3 \text{Cl}_{25} [\text{SO}_6^4]}{\text{Ca}_{54} \text{Na}_{35} [\text{Mg}_{11}]}$	Хлоридно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая, ультрапресная
Озеро Голубое	-13.5	-99.97	$M_{3,1} = \frac{\text{SO}_{90}^4 \text{HCO}_{10}^3}{\text{Ca}_{49} \text{Mg}_{27} \text{Na}_{25}}$	Сульфатная натриево-магниево-кальциевая, соленая

Исследования поверхностной гидросферы (реки, озера, Куйбышевское водохранилище) на территории Казани выявили широкие вариации значений минерализации. Выделяют пресные (с минерализацией 70–90 мг/дм<sup>3</sup>) воды гидрокарбонатного, гидрокарбонатно-сульфатного состава и слабоминерализованные (с минерализацией до 250–320 мг/дм<sup>3</sup>) сульфатные

кальциевые воды. Значения изотопов в гидросфере Казани варьируют в широком диапазоне:  $\delta D$  изменяется от -61,95 до -110 ‰, а  $\delta^{18}O$  – от -5,92 до -15,1. Как следует из анализа изотопных данных (рис.3.8., табл. 3.3.) отчетливо различаются подземные и поверхностные воды Казани. Для первых характерны более легкие значения стабильных изотопов (среднее  $\delta D$  -103,3 ‰,  $\delta^{18}O$  -13,9 ‰), а для поверхностных вод – более тяжелые значения (среднее  $\delta D$  -86,3 ‰,  $\delta^{18}O$  -10,9 ‰). По изотопному составу выявлена связь между поверхностными водами реки Солонка и Голубого озера с подземными водами нижеказанского водоносного комплекса, что, по-видимому, подтверждает ландшафтно-гидрологические и геологические особенности. В частности, изотопные данные свидетельствуют в пользу большой доли подземных вод в водном балансе поверхностных вод реки Солонка и Голубого озера.

Так, река Солонка и Голубое озеро имеют смешанное питание со значительной долей подземного стока (преимущественно за счет растворения карбонатно-сульфатных пермских пород), вследствие чего наблюдается повышенная минерализация вод. Река Казанка, приустьевая часть которой находится в центре Казани, имеет смешанное питание с преобладанием снегового и дождевого (более 70 %). Вода относится к гидрокарбонатно-сульфатным кальциевым, а ее минерализация достигает 1000 мг/дм<sup>3</sup>, что связано с техногенно-антропогенным прессом на долину реки Казанка. В последние годы неотъемлемой частью при изучении гидросферы становятся изотопные исследования подземных и поверхностных вод. Особенно часто используются данные об изотопном составе водорода  $\delta D$  (<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H) и кислорода  $\delta^{18}O$  (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O). Значения содержания изотопов  $\delta^{18}O$  в озерах изменяются от -13,58 до -5,92 ‰,  $\delta D$  от -99,97 до -61,95 ‰, дейтериевый эксцесс (dexс) от -14,6 до 8,7 ‰, значения содержания изотопов  $\delta^{18}O$  в реках изменяются от -13,10 до -9,96 ‰,  $\delta D$  от -94,26 до -78,43 ‰, dexс от -1,2 до 8,7.

Сравнительно, образцы поверхностных вод отклонены от ЛЛМВ, это подразумевает, что на реки и озера значительно повлияло испарение [7,31,32].

По химическому составу воды рек Казани относятся к гидрокарбонатно-

хлоридным кальциевым и гидрокарбонатно-сульфатным кальциевым. Средние значения ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ ) водоносных комплексов и подземных вод (снизу→вверх): сакмарский водоносный комплекс ( $\delta^{18}\text{O} = -15,08$ ;  $\delta^2\text{H} = -111,15$ ) → нижеказанский водоносный комплекс ( $\delta^{18}\text{O} = -14,0$ ;  $\delta^2\text{H} = -104,6$ ) → неогеновый водоносный комплекс ( $\delta^{18}\text{O} = -13,15$ ;  $\delta^2\text{H} = -96,32$ ) → четвертичный водоносный комплекс ( $\delta^{18}\text{O} = -12,6$ ;  $\delta^2\text{H} = -91,5$ ) → поверхностные воды ( $\delta^{18}\text{O} = -11,04$ ;  $\delta^2\text{H} = -86,65$ ). Показано (табл.3.3), что чем ближе к поверхности земли расположены подземные воды, тем тяжелее средние значения изотопного состава.

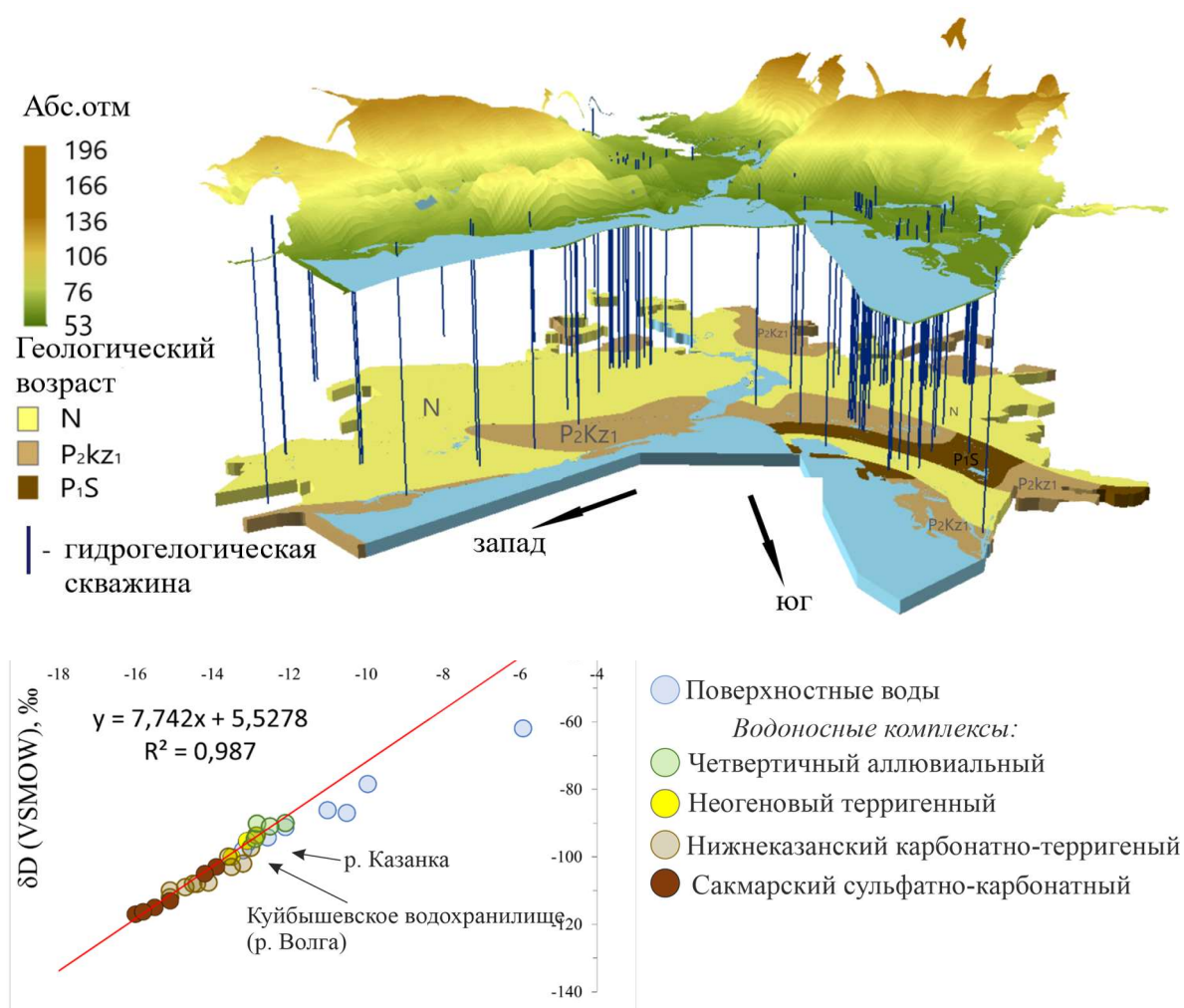


Рисунок 3.8. Изотопный состав природных вод. Сплошная красная линия - ЛЛМВ г. Казань (см. рис. 3.6)

Таблица 3.3. Химический состав подземных вод на территории города Казани, мг/дм<sup>3</sup>

Показатели	*М	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	δ <sup>18</sup> O-	δ <sup>2</sup> H	Количество проб
Сакмарский водоносный комплекс (P <sub>1s</sub> )											
Максимальные	1279,3	316,6	100,0	12,85	6,5	464,6	647,1	7,5	-16	-117,1	425
Средние	787,4	140,6	40,7	9,8	4,2	360	222,1	7,1	-15,08	-111,5	
Минимальные	212,75	68,0	24,6	0,25	0,1	62,1	53,1	4,6	-13,9	-103	
Нижнеказанский водоносный комплекс (P <sub>2kz1</sub> )											
Максимальные	1579,3	425	69,1	12,3	6,3	596	721,8	42,1	-14,7	-112	238
Средние	923,5	227,4	34,2	10,4	5,1	333,0	258,3	13,4	-14	-104,6	
Минимальные	236,1	45,7	11,1	0,1	0,1	40,3	61,2	1,3	-12,85	-93,7	
Верхнеказанский водоносный комплекс (P <sub>2kz2</sub> )											
Максимальные	1346	248,0	69,2	72,2	40,4	498,0	625,1	48,7	-14,1	-108	89
Средние	855,7	117,2	29,5	49,8	26,0	311,6	346,2	24,15	-13,9	-101	
Минимальные	260	5	2,6	21,6	17,5	203,0	14,7	4,12	-12,9	-95	
Неогеновый водоносный комплекс (N <sub>2</sub> )											
Максимальные	783,4	99	66	9,8	4,1	683,1	238	42	-13,5	-100	152
Средние	436,1	62,6	23,1	7,2	3,1	435,5	126,8	11,6	-13,15	-96,32	
Минимальные	107,3	23	0,33	0,01	0,01	55,2	0,11	0,8	-12,85	-93,7	
Четвертичный водоносный комплекс (Q)											
Максимальные	1530,2	112,3	43,1	75,4	36,8	593,1	1094,0	347,1	-12,9	-94,7	29
Средние	643,8	35,2	15,8	4,74	2,0	264,7	96,6	37,3	-12,6	-91,5	
Минимальные	133,8	16,8	0,3	0,19	0,04	42,3	21,33	12,5	-12,1	-90	
Поверхностные воды											
Максимальные	523,1	38	17	32,7	16,1	634,1	59,3	27	-13,2	-98,1	149
Средние	314,8	21,4	12,1	12,1	7,1	246,8	35,2	12,8	-11,04	-86,65	
Минимальные	68,1	0,1	0,01	0,2	0,1	7,1	8,6	0,9	-5,92	-61,95	
Примечания: *М - минерализация;											

Как видно на рис. 3.8, все выборки как безнапорных вод (четвертичный и неогеновый водоносные комплексы), так и напорных вод (нижеказанский и сакмарский водоносные комплексы) располагаются вблизи ЛЛМВ, что указывает на то, что питание подземных вод данной зоны осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и последовательных нисходящих перетоков из верхних горизонтов в нижние.

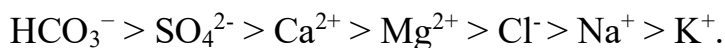
А именно, главными источниками питания водоносных комплексов на территории города Казани являются Куйбышевское водохранилище (река Волга) и река Казанка, так как расположение стабильных изотопов на глобальной линии метеорных вод схоже с четвертичным и неогеновым водоносными комплексами.

Часть изотопного состава подземных вод сакмарского водоносного горизонта по своим значениям аналогичны с нижеказанским водоносным горизонтом, что указывает на восходящую фильтрацию нижнепермских водоносных подразделений в нижеказанский водоносный горизонт. Стоит отметить, что средние значения водоносных комплексов, приуроченных к породам кайнозоя и пермской системы, варьируют в широком диапазоне, что свидетельствует о медленной нисходящей фильтрации атмосферных осадков по проницаемым зонам осадочных пород; латеральное движение подземных вод также, по-видимому, происходит медленно.

На исследуемой территории основными водовмещающими отложениями являются: известняки ( $\text{CaCO}_3$ ), доломиты ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), гипсы ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ангидриты ( $\text{CaSO}_4$ ). В результате растворения вышеперечисленных карбонатных (растворение по типу гидролиза) и сульфатных минералов в водную фазу переходят дополнительные концентрации макроанионов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) и макрокатионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ). Вследствие этого происходит формирование подземных вод повышенной минерализации (более  $1000 \text{ мг/дм}^3$ ) и общей жесткости (более 7 и даже 10 оЖ).

Как видно из данных табл. 3.3, основные ионные концентрации водоносных комплексов схожи по своему расположению, что указывает на

тесную взаимосвязь поверхностных, безнапорных и напорных горизонтов:



Большое количество данных анализа подземных вод можно напрямую спроецировать на диаграмму Пайпера, что облегчает интерпретацию гидрохимических данных. Именно графическое представление основных ионов помогает быстро определить гидрохимические характеристики подземных вод. Концентрации основных катионов и анионов представлены в нижних треугольниках слева и справа соответственно. Ромб в верхней части диаграммы представляет собой состав обоих ионов.

Как видно из рис. 3.9, в целом пробы подземных вод спроецировались в две зоны геохимической фации I (Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub>) и IV (Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>). Различный тип подземных вод за два периода связан с разнообразным питанием водоносного комплекса за счет перетекания из вышележащих водоносных подразделений, а также за счет перетекания из нижнепермских водоносных подразделений.

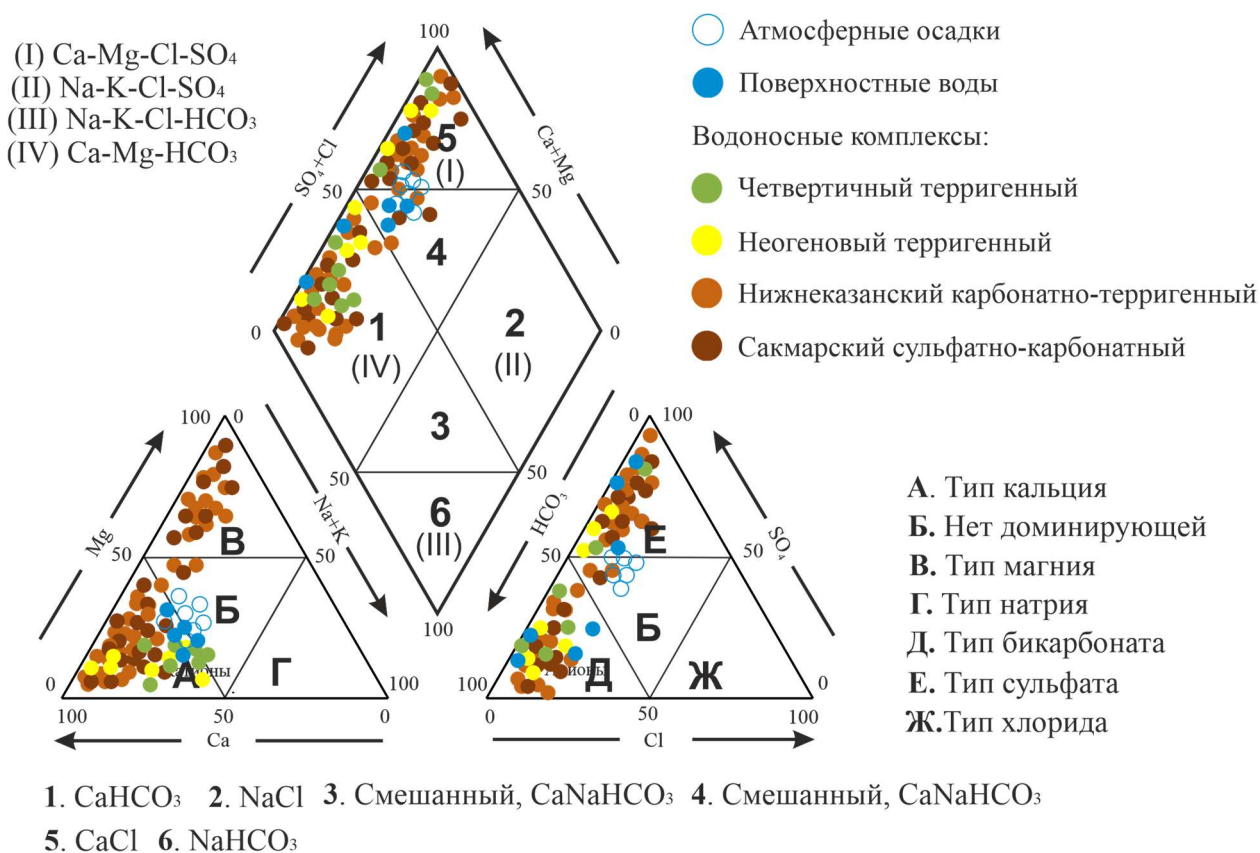


Рисунок 3.9. Типы воды природных вод на исследуемой территории по диаграмме Пайпера

Нижние треугольники слева ясно показывают, что все пробы подземных вод в районе исследования богаты кальцием. Подземные воды пермского периода обогащены ионами магния. Нижние треугольники справа показывают, что подземные воды имеют сульфатный и бикарбонатный типы, вероятно, эти гидрохимические типы тесно связаны со взаимодействием воды с горными породами, таким как растворение алюмосиликатных и карбонатных минералов.

Воды сакмарского водоносного горизонта характеризуются сильной связью содержания ионов кальция и содержания сульфат-ионов (рис.3.10), поскольку формируются они при растворении гипсовых пород. При этом данные воды недонасыщены по кальцию, вероятно, за счет обменных реакций, в которых кальций замещается в растворе другими катионами.

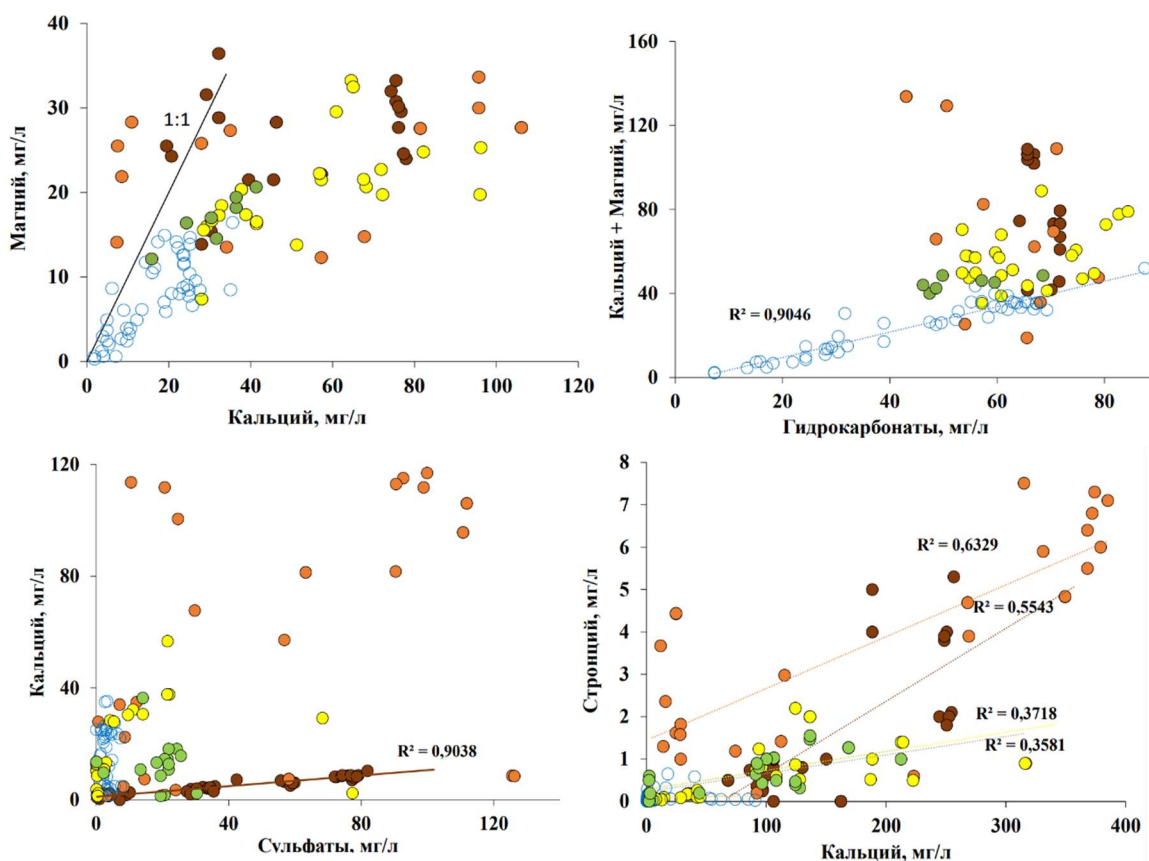


Рисунок 3.10. Взаимосвязь концентрации основных ионов в подземных водах на территории города Казани

Воды казанского яруса, напротив, не имеют связи в содержаниях ионов кальция и сульфат-иона, что указывает на наличие различных источников поступления элементов в раствор. Визуально для казанского яруса можно

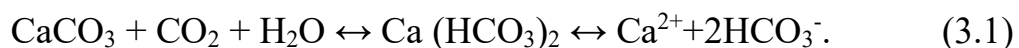


выделить 3 ветки: нижняя ложится на линию зависимости сакмарского яруса, верхняя совпадает с нечеткой (облачной) взаимозависимостью ионов кальция и сульфатов по неогеновому водоносному горизонту, а часть точек занимает промежуточное положение, соответствуя при этом точному эквивалентному соотношению ионов кальция и сульфат-иона в ангидриде.

Для казанского яруса характерно самое высокое содержание как сульфат-иона, так и ионов кальция, из всех рассматриваемых горизонтов. Для поверхностных вод характерно содержание сульфат-иона на уровне 7 мг/дм<sup>3</sup>, не связанное с вымыванием кальция, т. е. обусловленное атмосферными осадками. Вероятнее всего, именно за счет атмосферных вод формируется содержание сульфатов в водах неогеновой толщи.

Итак, можно выделить следующие группировки проб по отношению к связи сульфат-иона и гидрокарбонат-иона с кальцием: с атмосферным формированием состава - поверхностные, с формированием состава за счет углекислотного выщелачивания в инфильтрационных водах - часть неогеновых, небольшая часть казанских, очевидно контактирующая с вышележащими толщами по трещинам в породе, с формированием состава за счет размывания гипсовой толщи - воды сакмарского горизонта и отчасти казанского, вероятно, при контакте с сакмарским.

Ион кальция является доминирующим катионом в водоносных комплексах. Одним из наиболее важных источников Ca<sup>2+</sup> в природных водах являются известняки, доломиты и известковистый цемент терригенных горных пород, которые растворяются в воде по следующей схеме:



Значительные количества ионов кальция переходят в воду за счет растворения гипса, широко распространенного в земной коре. Территория города Казани подтверждает данные выводы, так как здесь достаточно отчетливо проявлена пространственная приуроченность водопунктов с преобладанием кальциевых вод к площадям с повышенным содержанием кальцитовой составляющей в породах верхней части осадочного разреза.

Ионы магния присутствуют во всех природных водах исследуемой территории. Ионы магния поступают в природные воды преимущественно при растворении доломитов, доломитовых мергелей и продуктов их выветривания. Данный факт четко фиксируется на территории города Казани.

Наиболее сильная связь между концентрациями  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  наблюдается в поверхностных водах (рис.3.10). В водах всех горизонтов преобладает кальций, что связано с их контактом с осадочными карбонатными породами. Преобладание магния характерно для некоторых проб воды пермских горизонтов, что указывает на их морское происхождение, поскольку магний является элементом, характерным для океанической ветви литогенетического цикла воды.

Основными природными процессами, формирующими гидрогеохимические показатели некондиционных подземных вод, являются:

- растворение минералов водоносных пород, обуславливающее увеличение концентраций основных макроанионов и макрокатионов;
- процессы ионного обмена в системе «вода-порода», вследствие которых происходит изменение эквивалентных соотношений макрокомпонентов, влияющих на миграционную способность основных катионов;
- окислительно-восстановительные процессы, благоприятные для миграции нормируемых переменновалентных элементов, таких как железо, марганец, сера, азот.

## **ГЛАВА 4. ВОЗДЕЙСТВИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ**

### **4.1. Типы природно-техногенных систем**

Отклонения от естественного геохимического состояния подземных вод происходят в результате техногенной нагрузки на геологическую среду различных типов техногенных систем: водохозяйственного, транспортного, промышленного, селитебного, плюс отходы производства и потребления [1,95,59,1,15,16,49].

Изменение природного химического состава подземных вод обусловлено действующими на территории города Казани типами природно-техногенных систем: 1) это водохозяйственный тип; 2) транспортный; 3) промышленный; 4) селитебный; 5) отходы производства и потребления.

1. Водохозяйственный тип природно-техногенных систем на территории города Казани представлен водозабортным подтипом (водозаборные скважины, колодцы и родники), объекты которого, преимущественно, относятся к точечному виду загрязнения. При эксплуатации водозаборных сооружений формируются депрессионные воронки; изменяются, обычно в сторону понижения, динамические параметры (напоры, уровни) подземных вод; истощаются природные запасы, и происходит трансформация химического состава подземных вод. Кроме того, снижение качества подземных вод часто вызвано инфильтрацией загрязнения с поверхности, а также оно происходит за счет поглощения подземной гидросферой поверхностного стока. Источниками такого загрязнения являются различные промышленные и бытовые отходы города. Накопление загрязняющих веществ в водоносном горизонте обусловлено тем, что скорость их поступления с поверхности земли значительно выше скорости водообмена в пласте. Кроме того, в процессе эксплуатации происходит подток к водозабору природных некондиционных или техногенных вод. Например, для водозаборов Казани на левобережье Волги характерны высокие значения в подземных водах минерализации (до 2500 мг/дм<sup>3</sup>), общей жесткости (до 35 °Ж), сульфат-ионов

(до 1500 мг/дм<sup>3</sup>), что связано с разгрузкой здесь сульфатных вод глубоких нижнепермских горизонтов. Для водозаборных сооружений установлена зависимость в изменении химического состава подземных вод от срока эксплуатации и интенсивности водоотбора из скважин. Так, с увеличением водоотбора в отдельных скважинах фиксируется повышение сухого остатка, сульфат- и хлор-ионов, общей жесткости, нитратов. При длительной эксплуатации водозабора существенно повышаются вышеуказанные компоненты, а также содержания гидрокарбонат-иона и железа.

2. Транспортный тип природно-техногенных систем представлен железнодорожным, автодорожным, подземным (метро), трубопроводным, электрическим подтипами, относящимися к линейному виду воздействия на геологическую среду. Также данный тип представлен подтипом транспортных узлов, относящимся к площадному виду воздействия и представленным автотранспортными предприятиями, железнодорожными и механическими мастерскими, депо, машинно-тракторными парками, речным портом и причалами, автозаправочными станциями, складами нефтепродуктов. Функционирование данных объектов приводит к загрязнению почвы, поверхностных и грунтовых вод нефтепродуктами и солями тяжелых металлов. Наибольшее количество загрязняющих веществ приходится на долю автотранспорта (оксид углерода, углеводороды, окислы азота и свинца, сажа, сернистые соединения и т. п.).

3. Промышленный тип природно-техногенных систем делится на следующие подтипы: машиностроительный, химический и нефтехимический, строительный, энергетический. Территория города Казани входит в состав Казанско-Зеленодольского промышленного узла. Здесь произошло срастание урбанизированных и промышленных участков (рис. 4.1), которые являются основными очагами антропогенно-техногенного воздействия на окружающую среду, в том числе и на геологическое (гидролитосферное) пространство. Казань – важный индустриальный центр России, здесь сосредоточено 3069 крупных, средних и мелких промышленных предприятий.

Самыми крупными промышленными предприятиями на исследуемой территории являются – ГУП «Теплоконтроль», ОАО «Нэфис», ОАО «Радиоприбор», ОАО «КВАРТ», Казанская ТЭЦ-1 и др.

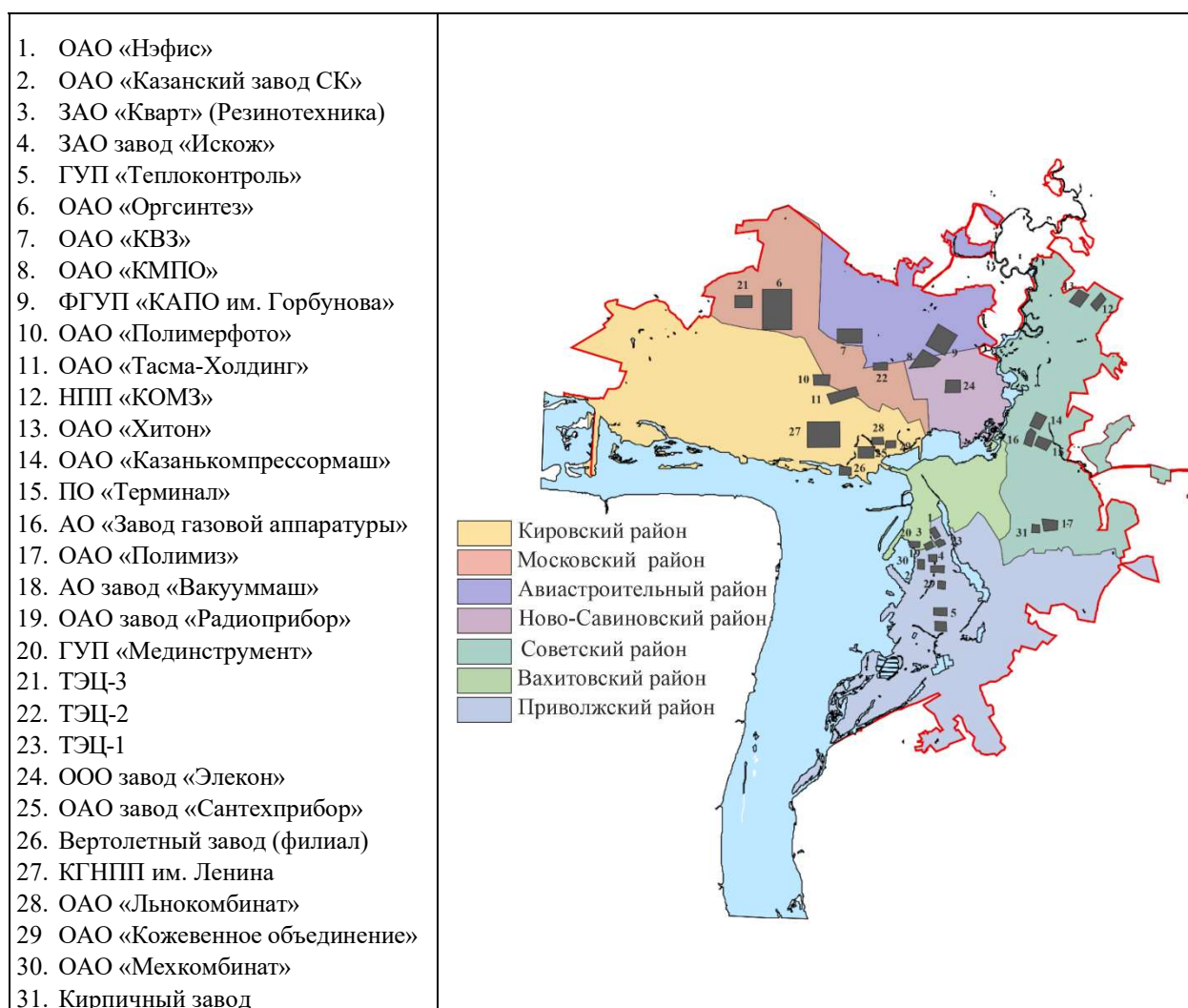


Рисунок 4.1. Расположение предприятий и промышленных зон на территории города Казани

Казанская ТЭЦ-1 была введена в строй в 1933 году. Она является крупным источником теплоснабжения городских промышленных и жилищно-коммунальных потребителей.

Выбросы таких предприятий характеризуются большим разнообразием загрязняющих веществ: это пыли различного состава, дымы, газы – сернистый ангидрид, окись углерода, окислы азота, соединения фтора и т. п. Кроме того, на некоторых предприятиях имеются водоемкие производства, что влечет за собой значительный сброс сточных вод в поверхностную и подземную гидросферы. Промышленные воды содержат различные токсичные вещества,

тяжелые металлы, механические взвеси, минеральные масла, аммиак, спирты, альдегиды, кетоны, фенолы, смолы, сероводород, представляющие опасность для поверхностных и подземных вод. Предприятия химической и нефтехимической промышленности (ОАО «Нэфис», ПО) относятся к наиболее опасным с экологической точки зрения предприятиям, они приносят в окружающую среду толуол, бензол, аммиак, метиловый спирт, фенол, сероводород, ксилол, этилацетат, кислоты, углеводороды и другие соединения.

4. К объектам селитебного типа относится сумма строений Казани, включающая жилые постройки, промышленные предприятия, сеть подземных коммуникаций и др. Размещение техногенных объектов на городской территории создает механическую нагрузку на грунты, нарушая водооборот и сток грунтовых вод. В результате функционирования промышленных и коммунальных предприятий городов происходит загрязнение их территорий токсичными веществами.

5. Отходы производства и потребления Казани представлены твердыми и жидкими отходами свалок, отстойников и очистных сооружений, которые относятся к площадным источникам воздействия на окружающую среду.

Критическая обстановка сложилась с утилизацией, обезвреживанием и захоронением отходов. На территории Приказанского района ежегодно образуются сотни несанкционированных свалок бытовых и строительных отходов. Выбор участков для большинства свалок и полигонов, их строительство и эксплуатация осуществляются с грубейшими нарушениями природоохранного законодательства. Проекты не проходят экологическую экспертизу, имеется ряд серьезных отклонений от существующих санитарных норм и правил, однако эксплуатация большинства свалок продолжается по настоящее время.

Самосыровская свалка является одним из крупнейших объектов складирования ТБО в РТ, она расположена в 3,0 км к юго-западу от села Самосырово Высокогорского района (рис. 4.2). Свалка была введена в

эксплуатацию для нужд Советского района Казани 31 марта 1960 года. Согласно акту отвода участка от 14.08.1959 г., территория свалки составляла 8 га. До настоящего времени отвод дополнительных земель под свалку и полигон не производился. С 1972 года на свалку вывозятся бытовые отходы практически со всей территории города Казани, а также некоторые виды твердых промышленных отходов III и IV класса опасности, т. е. она действует как городская свалка твердых бытовых отходов.



Рисунок 4.2. Техногенные объекты Казани (Отходы производства и потребления, водозаборные скважины)

Отходы производства и потребления города Казани способствуют повышению в почвах и грунтовых водах городской территории соединений азота, сульфатов, железа, кальция, гидрокарбонатов, тяжелых металлов и др. Кроме того, в подземные воды попадает большое количество бактерий и микроорганизмов. Переработка твердых бытовых отходов и отходов производства является одной из наиболее острых проблем в жизни современного города.

Таким образом, геологическая среда Казани испытывает интенсивное воздействие со стороны техногенных объектов, в результате чего в природную

среду поступает большое количество компонентов-загрязнителей (табл.4.1), в отдельных геосферах на территории города формируются априродные аномальные участки.

Таблица 4.1. Примеры приуроченности компонентов-загрязнителей к разным видам отходов

Типы природно-техногенных систем:	Макрокомпоненты	Микрокомпоненты
Водохозяйственный	Сухой остаток, общая жесткость, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, NO <sub>3</sub>	Fe
Транспортный	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	Fe, P, Al, Cu, Pb, Mn, Ni, Co, Zn, Cr, Li
Промышленный	HCO <sub>3</sub> , Na, K, Ca, Mg, SO <sub>4</sub> , Cl, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	Fe, P, Al, Cu, Pb, Mn, Ni, Co, Zn, Cr, Li
Селитебный	NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	Na, K
Отходы производства и потребления	HCO <sub>3</sub> , Na, K, Ca, Mg, SO <sub>4</sub> , Cl, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	Fe, Mn, Cu, B, Cd, Ni, Cr

#### 4.2. Кластерный анализ состояния поверхностных вод

Изучение химического состава поверхностных вод позволяет оценить влияние человеческой деятельности на поверхностную гидросферу [40,55]. Загрязнения, поступающие в поверхностные водные объекты, связаны с разными природными причинами, характерными для определенных гидрологических циклов. Так, в период ледостава за загрязнения поверхностных вод преимущественно отвечают подземные воды; в весеннее половодье – это твердые атмосферные осадки, накапливающие загрязнители за зимние месяцы; в летне-осенний период – это загрязнения, связанные с дождевыми водами, попадающими в водосборный бассейн, и, частично, разгрузка подземных вод. Кроме того, на промышленно-урбанизированных территориях важным фактором является антропогенная и техногенная деятельность в течение всего года.

Кластерный анализ относится к методам многомерной статистики и



выделяет на основе множества переменных компонентов гидрохимического анализа классы (кластеры) параметров, которые более сходны по сравнению с объектами, входящими в другие классы. Кластеризация данных проводилась в три этапа. На первом этапе данные ранжировали относительно начальной точки по евклидовым расстояниям и производили группировку с условием формирования до 40 классов; вычислялись средние значения показателей загрязнения для каждого класса. На втором этапе применялся агломеративный иерархический подход классификации методом дальнего соседа (с группировкой не более 7 классов), а также были определены общие качественные характеристики членов каждого класса по отношению к ПДК; снова вычислялись средние значения показателей загрязнения для каждого класса. Процесс кластеризации воспроизводился несколько раз для обнаружения устойчивых групп данных. На третьем этапе проводили построение графика евклидовых расстояний от выбранной начальной точки до каждого из полученных классов. Таким образом, большое число рассматриваемых параметров качества воды было выражено через меньшее число емких характеристик, удобное для визуального восприятия пространственной модели распределения показателей качества поверхностных вод Казани.

В связи с низкой способностью к самоочищению поверхностные воды подвержены существенному антропогенному и техногенному воздействию. Например, превышения ПДК в поверхностных водах Казани за исследованный период (2014–2020 год) фиксируются по химическому потреблению кислорода (ХПК) и фенолам. Более высокие уровни ХПК в поверхностных водах означают большее количество окисляемого органического материала, который снижает уровень растворенного кислорода и в результате может привести к анаэробным условиям, что вредно для более высоких водных форм жизни. Наличие ХПК в грунтовых водах свидетельствует о риске образования побочных продуктов (тригалометанов) при обеззараживании воды активным хлором.

Значение ХПК в незагрязненных водоемах составляет 2–10 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, в слабозагрязненных – 10–30 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, в сильнозагрязненных – от 60 мг O<sub>2</sub>/ дм<sup>3</sup> и выше (СанПиН 2.1.5.980-00). Пространственное распределение ХПК поверхностных вод для 3-х гидрологических циклов представлено на рисунке 6.7. Средние значения ХПК на всей исследуемой территории увеличивается от зимнего (26,6 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) к летне-осеннему периодам (39 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). Повышенные (более 60 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) значения ХПК зафиксированы в озере Верхний Кабан в зимний период.

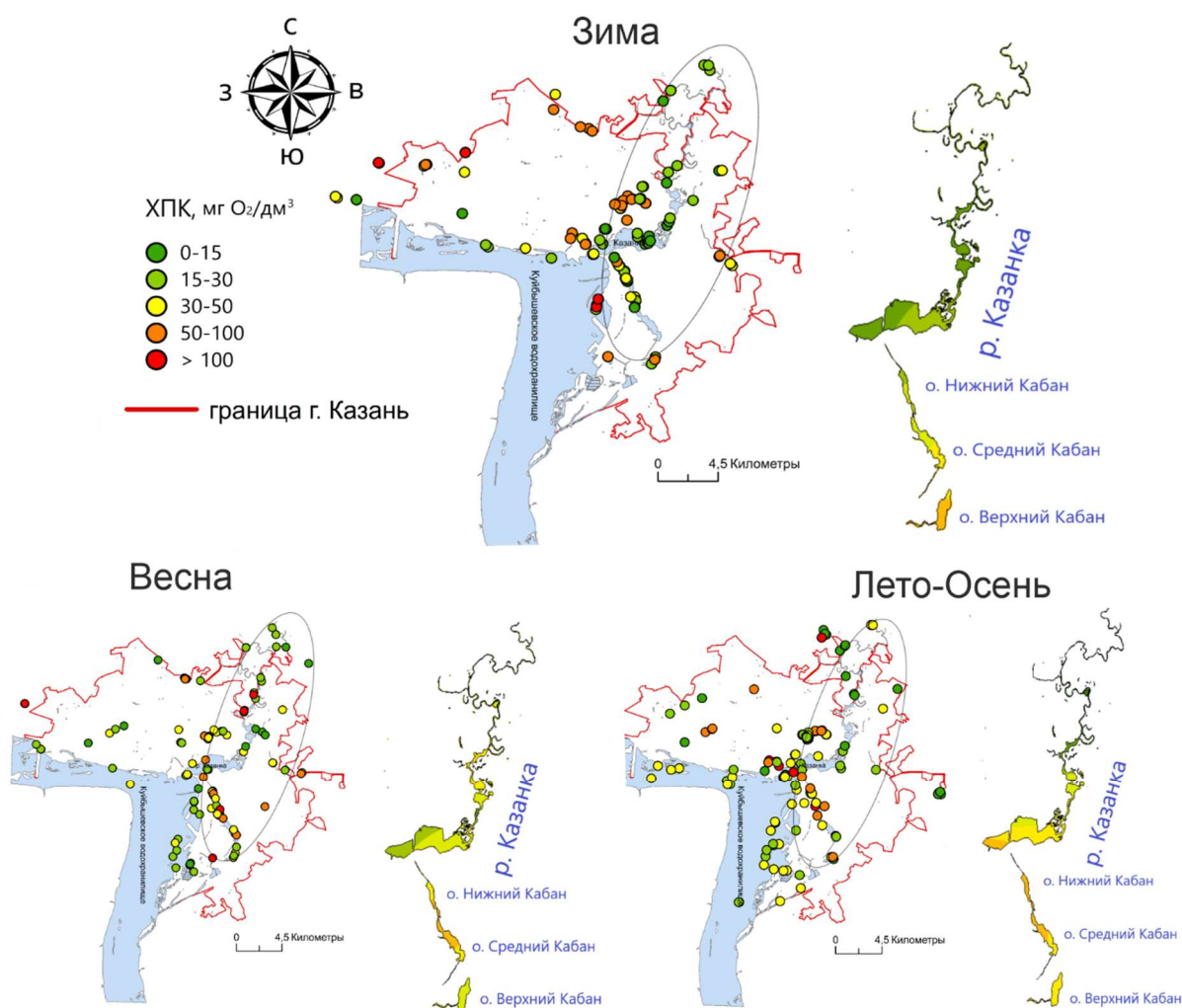


Рисунок.6.7. Распределение ХПК в поверхностных водах. Слева - места отбора гидрохимических проб и значения ХПК; справа - распределение ХПК в р. Казанка и оз. Кабан

Статистическая обработка результатов анализов поверхностных вод города Казани выявила компоненты с превышениями ПДК. Так, более половины зимних проб имеют превышения по аммонии, сульфатам, фенолам;

в весенних и летне-осенних пробах содержатся повышенные значения сульфатов и фенолов. Особое внимание стоит уделить содержаниям фенолов (4–й класс опасности) в поверхностных водах Казани, превышающим ПДК (0,001 мг/дм<sup>3</sup>). В весенний период (после снеготаяния) содержание фенолов превышает ПДК в 5 раз, в летне-осенний и зимний периоды - в 2 раза. Отмечены превышения ПДК (в 10 раз и более) для значений ХПК.

Для оценки степени загрязнения поверхностных вод в пределах городской черты были проанализированы пробы поверхностных вод с наиболее благополучными с точки зрения качества воды объектами (фоновые территории) – это озера Ковалинское и Архиерейское в Лаишевском районе (табл. 4.2). Критический уровень загрязнения отмечен в системе озер Кабан и в старом русле реки Казанка.

Таблица 4.2. Средние гидрохимические показатели озер по периодам

Показатели, единицы измерения	Озера Ковалинское и Архиерейское (пригороды Казани)			Озера Средний и Нижний Кабан (центр Казани)		
	Зима	Весна	Лето - осень	Зима	Весна	Лето - осень
Аммоний ион, мг/дм <sup>3</sup>	0,24	0,15	0,05	0,47	0,5	0,36
Кислород растворенный, мгО <sub>2</sub> / дм <sup>3</sup>	15,93	13,70	13,97	4,2	19	12,68
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,006	н.о	н.о	0,012	0,007	0,11
Нитриты + нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	1,05	0,08	н.о	8,4	28,9	30
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	3,36	7,26	1,752	341	322,7	349
Фенол, мг/дм <sup>3</sup>	0,0001	н.о	н.о	0,0007	0,0001	0,0014
Фосфат ион, мг/дм <sup>3</sup>	0,012	0,093	н.о	0,96	0,07	0,08
ХПК, мг О <sub>2</sub> / дм <sup>3</sup>	18,1	22,0	22,4	55,5	32,7	57
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	5,28	5,74	8,60	116,1	145,5	117,96
ТМ, мг/дм <sup>3</sup>	0,074	0,051	н.о	1,7	0,14	1,7
Количество проб	28	17	42	23	21	39

*Примечание:* н. о. – не обнаружено.

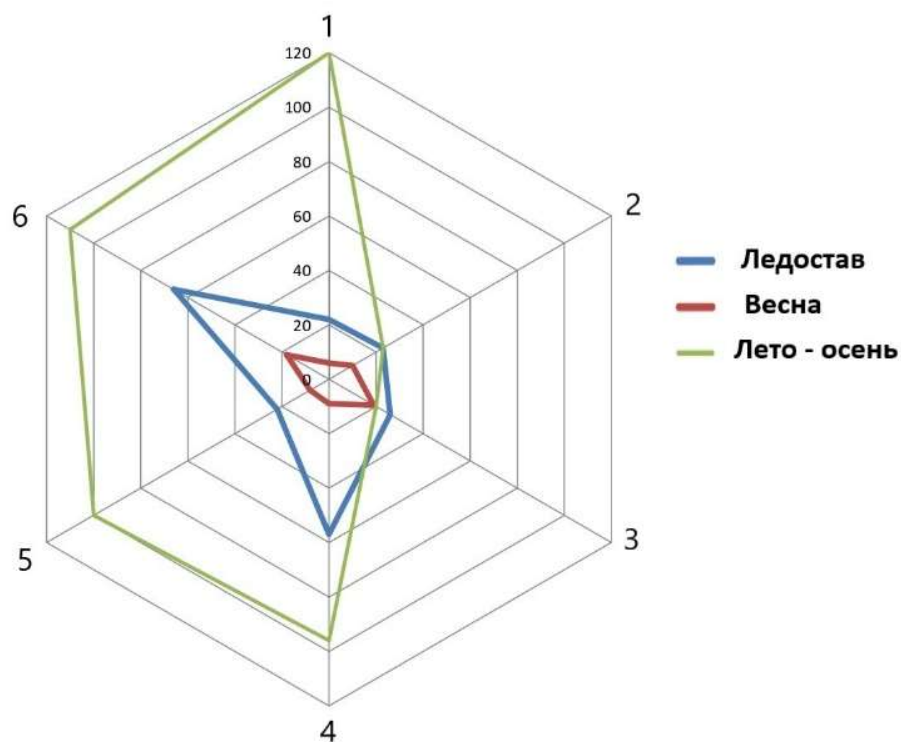


Рисунок 6.8. Евклидово расстояние от начальной (эталонной) точки до кластеров, выделенных по иерархическому алгоритму

Результаты анализов поверхностных вод были разделены с помощью кластерного метода на 6 групп по гидрохимическим показателям относительно ПДК. К нулевой группе (центр диаграммы на рис. 6.8) отнесены воды с показателями без превышений ПДК – эталонная группа. 1–ая группа включает воды с незначительными превышениями ПДК по аммонии, сульфатам; 2–ая группа объединяет воды с биогенным загрязнением (высокие значения ХПК); 3–ья группа - это воды с загрязнением по аммонии и фосфатам; 4–ая группа состоит из вод, загрязненных соединениями азота; 5–ая группа включает воды с превышениями ПДК по большинству компонентов, 6–ая группа - это воды с высоким содержанием тяжелых металлов и фенолов (техногенное загрязнение).

Проведенная кластеризация гидрохимических данных с распределением по гидрологическим циклам (рис. 6.9) позволила установить, что внутригодовые изменения содержания тяжелых металлов и фенолов на исследуемой территории достигают максимальных значений в период весеннего половодья (кластер 6). Предположительно, данное загрязнение

связано с поверхностным смывом с водосборной площади. Северная часть территории в зимний период по показателям загрязнения поверхностных вод в целом благополучна, имеет незначительные превышения ПДК по аммонии, сульфатам (кластер 1), указывая на влияние в этот период подземных вод. Значения ХПК выше ПДК (кластер 2) зафиксированы в летне-осенний период за счет цветения воды, а в весенний период - воды р. Казанка.

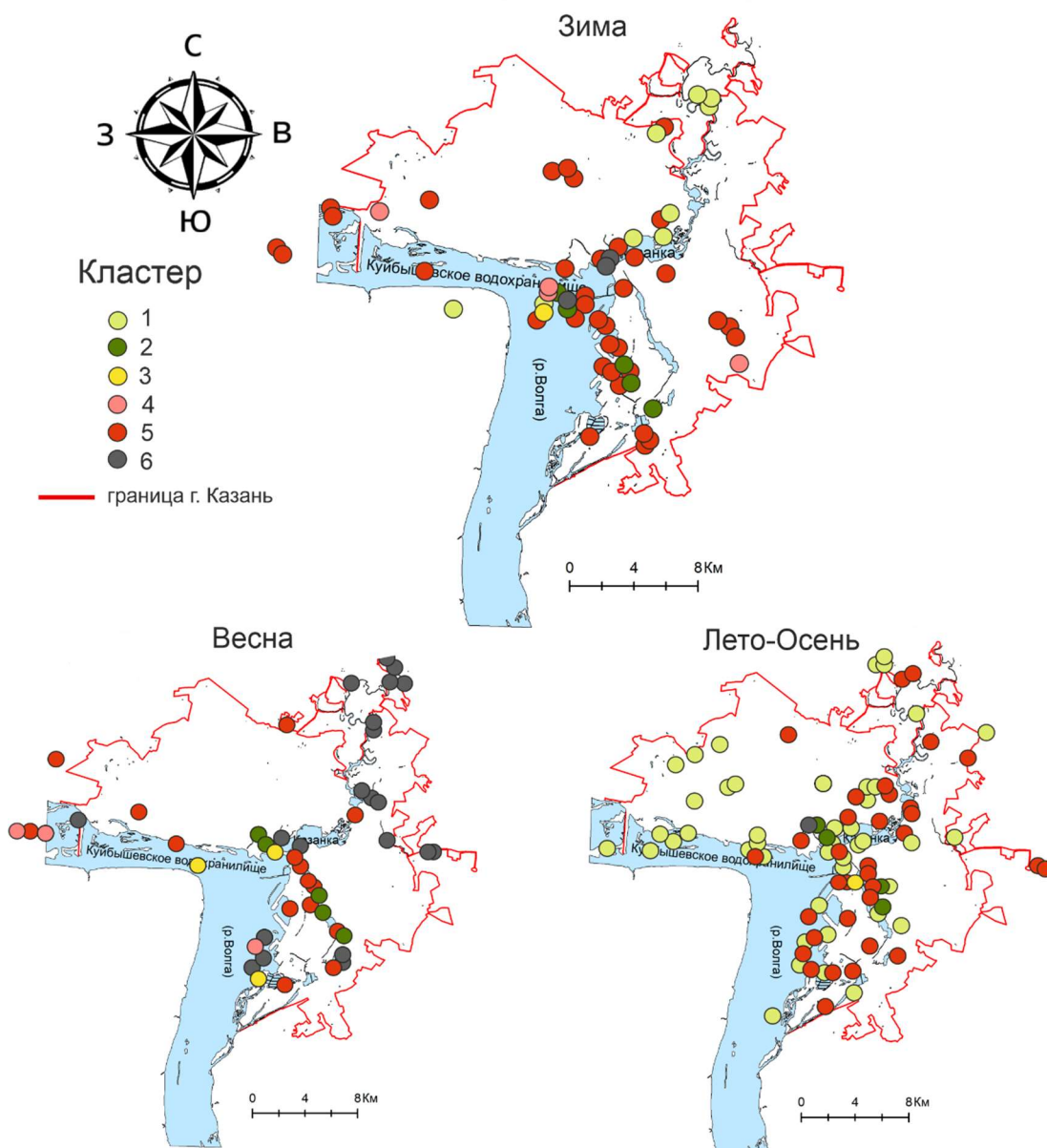


Рисунок 6.9. Кластеры загрязнения поверхностных вод на территории города Казани

На основе результатов исследования установлено, что полностью благополучных по химическому составу поверхностных вод объектов на территории города не обнаружено. Выявлено, что минимальная техногенная

нагрузка на поверхностные воды города приходится на весенний период. Наибольшее количество превышений ПДК фиксируется в период ледостава и весной – по фенолам, а в летне-осенний период – по фенолам, аммонии и фосфатам.

#### **4.3. Выделение показателей в подземных водах города Казани, содержание которых не соответствует нормативным требованиям**

Качество подземных вод контролируется федеральными, государственными и местными нормативными требованиями. Руководство по качеству питьевой воды впервые появилось еще в XIX веке в Европе. В России первые нормативные документы были опубликованы в середине XX века. На сегодняшний день нормативными документами, регламентирующими химический состав воды, в нашей стране являются: ГОСТ 2874–82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством» (включает оценку рисков для здоровья, связанных с различными микробиологическими, токсикологическими и органолептическими загрязнениями, которые могут присутствовать в питьевой воде); Гигиенический норматив ГН 2.1.5.1315-03 - это перечень нормативных показателей качества, в котором не дается толкование каждого норматива в части правил его достижения, тогда как СанПиН 1.1.4.1074-01 – это правила и нормы, где даются разъяснения по их применению. Качество воды характеризуется физическими свойствами (цвет, запах, вкус) и химическими свойствами (рН, мутность, общее содержание сухого остатка, жесткость, щелочность и т. д.). Основные показатели состава по требованиям к качеству воды первой и высшей категории приведены в табл. 4.3.

На территории Казани объектами для хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения из подземных источников служат следующие водоносные комплексы (сверху вниз): четвертичный терригенный (Q); неогеновый терригенный (N); пермский сульфатно-карбонатно-терригенный (P). Последний, в свою очередь, делится на казанский

карбонатно-терригенный (P<sub>2</sub>kz) и сакмарский сульфатно-карбонатный (P<sub>1</sub>s).

Таблица 4.3. Класс опасности элементов в подземных водах города Казани по органолептическому признаку

Класс опасности	Показатели, мг/дм <sup>3</sup>
1	Ртуть
2	Натрий, алюминий, барий, молибден, свинец, сурьма, бор, мышьяк, бромид-ион
3	Нитраты, аммоний-ион, фосфаты, марганец, никель, серебро, хром, цинк
4	Хлориды, сульфаты, фенолы

**Четвертичный терригенный водоносный комплекс.**

Гидрогеологический комплекс эксплуатируется в основном одиночными водозаборными скважинами для водоснабжения промышленных предприятий (ООО «Комбинат производственных предприятий» (КПП ОАО «КАЗТРАНССТРОЙ»), АО Завод ЖБИ-3, ОАО «ТАТМАШЭЛЕКТРОХИМ», Казанское отделение городской железной дороги, поселок Залесный).

Подземные воды водоносного гидрогеологического комплекса на рассматриваемых участках преимущественно пресные с минерализацией 0,1–1500 мг/дм<sup>3</sup>, гидрокарбонатные, различного катионного состава. Общая жесткость составляет от 2,2 до 12,9 °Ж. Грунтовые воды слабо защищены от загрязнения, особенно в верхней части.

Качество подземных вод не удовлетворяет нормативным требованиям, в основном в связи с повышенной минерализацией, жесткостью, фенольным индексом. Высокие значения зафиксированы по содержанию сульфат-иона, аммония, нитратов, железа, марганца (Приложение 1).

**Неогеновый терригенный водоносный комплекс.** Подземные воды представлены гидрокарбонатными кальциевыми пресными водами с преимущественной минерализацией 300–600 мг/дм<sup>3</sup>. В пределах наиболее погребенных участков палеодолин минерализация достигает 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Подземные воды комплекса на территории Казани широко используются

групповыми централизованными водозаборами в хозяйственно-питьевых целях, а также для водоснабжения промышленных предприятий. Наиболее крупными из них являются водозаборы «Мирный», «Танкодром».

В водоносном неогеновом комплексе практически все основные компоненты (водородный показатель, минерализация, все катионы и анионы, нитраты, аммиак, окисляемость) не превышают значений предельно допустимых концентраций (ПДК) для питьевых вод. Однако качество подземных вод не удовлетворяет нормативным требованиям для водозаборных скважин в основном в связи с повышенной жесткостью и повышенным содержанием сульфат-иона, общего железа и марганца (Приложение 2).

#### **Водоносный верхнеказанский карбонатно-терригенный комплекс.**

Практический интерес для целей водоснабжения гидрогеологический комплекс имеет на ограниченных участках. Частично эксплуатируется групповыми централизованными водозаборами: «Азино», «Аки», «Царицыно»; а также используется для водоснабжения промышленного предприятия казанского авиационного завода имени С. П. Горбунова и др.

Минерализация подземных вод верхнеказанского комплекса варьирует в широких пределах: от 260 мг/дм<sup>3</sup> и увеличивается в местах интенсивной разгрузки в подземные воды из нижнепермских водоносных подразделений, где достигает значения 1347 мг/дм<sup>3</sup> и затрагивает достаточно обширную область вдоль берега Куйбышевского водохранилища.

Воды нейтральные, слабощелочные, рН 7,0–7,9 от мягких до умеренно жестких, общая жесткость изменяется от 6,2 до 77 °Ж.

Качество подземных вод не удовлетворяет нормативным требованиям по минерализации, по общей жесткости, по содержанию железа, марганца, магния, сульфат-иона. В единичных пробах отмечены высокие значения нефтепродуктов, фенольного индекса, перманганатной окисляемости (Приложение 3).



### **Водоносный нижеказанский карбонатно-терригенный комплекс.**

Область распространения подземных вод верхнеказанского водоносного комплекса, преимущественно гидрокарбонатно-сульфатного и сульфатного состава. Для минерализации нижеказанского водоносного комплекса характерны значительные колебания (от 425 до 1579 мг/дм<sup>3</sup>) при средних значениях 923,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Гидрогеологический комплекс эксплуатируется централизованными водозаборами: «Щербаково», «Кадышево», «Залесный», «Солидарности», «Аки», «Азино». Большое количество промышленных предприятий, который используют нижеказанский водоносный комплекс: это химический комбинат «Нэфис», «Компрессормаш», завод «Радиоприбор» и др.

Качество подземных вод на этих водозаборах неудовлетворительное, в основном из-за повышенной минерализации, жесткости, перманганатной окисляемости и концентрации сульфат-иона.

В единичных пробах содержание магния (до 69,1 мг/дм<sup>3</sup>), аммония (до 2,9 мг/дм<sup>3</sup>) и нитратов (до 48,3 мг/дм<sup>3</sup>) может превышать предельно допустимые концентрации. Из микрокомпонентов: бериллий (до 0,01 мг/дм<sup>3</sup>), бор (до 0,18 мг/дм<sup>3</sup>), железо общее (до 6,6 мг/дм<sup>3</sup>), марганец (до 0,61 мг/дм<sup>3</sup>), стронций (до 7,32 мг/дм<sup>3</sup>) (Приложение 4).

### **Водоносный сакмарский сульфатно-карбонатный комплекс.**

Гидрогеологический комплекс эксплуатируется в основном водозаборными скважинами для водоснабжения промышленных и сельскохозяйственных предприятий: ТЭЦ-3, Казанский вертолетный завод, Казанская кондитерская фабрика «Заря» и т. д. По данным химического анализа, воды здесь гидрокарбонатно-сульфатные либо сульфатные магниевые-кальциевые, натриево-кальциевые, кальциевые, от пресных до весьма слабосоленых (212,7–1279,3 мг/дм<sup>3</sup>).

Качество подземных вод на этих водозаборах неудовлетворительное, в основном из-за повышенной минерализации, жесткости, концентрации сульфат-иона, магния, аммония. Из микрокомпонентов в единичных пробах

отмечены превышения по кадмию (до 0,0015 мг/дм<sup>3</sup>) и марганцу (до 0,301 мг/дм<sup>3</sup>), алюминию (до 0,51 мг/дм<sup>3</sup>) (Приложение 5).

Таблица 4.4. Перечень приоритетных показателей качества подземных вод Казани по эксплуатационным водоносным горизонтам

Водоносный комплекс	Показатели выше ПДК	Показатели 1, 2 –го классов опасности выше 0,5 ПДК
Q	Минерализация, общая жесткость, фенол (фенольный индекс), SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , Fe, Mn	Na+K
N	Общая жесткость, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn	Na+K,
P <sub>2kz2</sub>	Минерализация, общая жесткость, фенол (фенольный индекс), перманганатная окисляемость, SO <sub>4</sub> , Mg, NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , Fe, Be, B	-
P <sub>2kz1</sub>	Минерализация, общая жесткость, фенол (фенольный индекс), перманганатная окисляемость, SO <sub>4</sub> , Mg, NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , Fe, Be, B, Sr	Ba
P <sub>1s</sub>	Минерализация, общая жесткость, SO <sub>4</sub> , Mg, NH <sub>4</sub> , Cd, Mn, Sr	B, Ba

Результатом работ по систематизации показателей качества подземных вод на территории города Казани является перечень приоритетных показателей качества подземных вод по эксплуатируемым водозаборным скважинам. Автором систематизированы показатели качества воды, превышающие ПДК, для нормируемых химических элементов (соединений), по которым наблюдаются превышения норматива ПДК для химических элементов (компонентов) 3 и 4 – го классов опасности и 0,5 ПДК для химических элементов (компонентов) 1 и 2 – го классов опасности в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01 (табл. 4.4).

Сравнение результатов анализа проб подземных вод с пороговым значением ПДК выявило высокие концентрации по содержанию сульфат-иона, нитратов, железа. Особую озабоченность вызывают нитрат-ионы и общее железо, повышенные концентрации которых не связаны с природными особенностями региона.

## **ГЛАВА 5. ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА**

### **5.1. Математические методы прогнозирования динамики техногенного загрязнения**

Прогноз динамики изменения значений основных геохимических показателей качества питьевых подземных вод необходим в первую очередь для управления водными ресурсами и экосистемами. Хотя прогнозирование было частью экологии на протяжении десятилетий, текущие и ожидаемые изменения окружающей среды мотивируют растущий интерес к статистическому экологическому анализу и оценке долгосрочных тенденций изменения основных природно-техногенных компонентов подземных вод. Изменения качества воды можно рассматривать как временный процесс, а анализ должен учитывать временной порядок наблюдений. С целью ретроспективного анализа и прогноза геохимической обстановки к 2030 году автором диссертации из многочисленных геологических отчетов и архивных материалов были собраны результаты химических анализов подземных вод из различных водоносных горизонтов. Таким образом, к началу работ по составлению карт число опорных водопунктов составляло немногим более 123, в том числе:

- 52 эксплуатационные скважины неогенового водоносного комплекса;
- 71 эксплуатационная скважина нижнеказанского водоносного комплекса;

Был проведен предварительный анализ материалов с целью отбраковки недостоверных, требующих проверки, и наоборот, внимание акцентировалось на неординарных и неоднозначных материалах. Для построения карт были выбраны опорные водопункты с характерными и, по возможности, наиболее полными химическими анализами.

Отбраковке подверглись аналитические данные, не характерные для

водоносного комплекса в пределах нахождения водопункта, имеющие явные аналитические или механические (при наборе данных) ошибки. В случае если на один водопункт приходилось несколько опробований, для дальнейшего анализа выбирался наиболее «правильный» с точки зрения химии, наиболее полный по перечню контролируемых показателей или, при прочих равных, самый последний анализ. При условии нахождения в радиусе 1 км нескольких водопунктов на один горизонт предпочтение отдавалось эксплуатационным скважинам с наиболее представительным анализом или иному водопункту с анализом, наиболее характерным для всего множества представленных аналитических определений для рассматриваемой площади.

В данном исследовании на основе временных рядов проводился прогноз основных ионов на 2030 год, значения которых варьируют в широком диапазоне под действием техногенных факторов.

Временной ряд – совокупность наблюдений изучаемой величины, упорядоченных во времени числовых показателей, характеризующих уровень состояния и изменения изучаемого явления [135]. Наблюдения проводятся через одинаковые периоды времени. Самой важной частью анализа временных рядов является выбор возможных моделей, которые позволяют определить характер зависимости переменных с возможностью построения прогнозных значений. Анализ временных рядов с возможностью прогнозирования привлекал внимание многих исследователей [98,51,52]. Основные методы прогнозирования качества воды включают регрессионный анализ [104,116], применение искусственных нейронных сетей [108,107], ARIMA (интегрированная модель авторегрессии — скользящего среднего) моделирование [136, 138] и др.

Анализ опубликованных данных показывает, что ARIMA-моделирование позволяет с достаточной степенью точности осуществлять прогнозирование значений показателей качества природной воды [111,146,104]. В частности, популярность интегрированной модели авторегрессии – скользящего среднего ARIMA обусловлена ее гибкостью.

ARIMA имеет несколько преимуществ по сравнению с другими методами анализа временных рядов [115]. Модель может обрабатывать целую серию корреляций между наблюдениями, которые, как правило, часто возникают при анализе временных рядов [98,114,118,116,140].

Полное наименование – ARIMA (p, d, q), где AR представляет собой авторегрессию, p — количество членов авторегрессии, MA — скользящее среднее, q — количество членов скользящего среднего, d — количество разностей, сделанных для стационарности временного ряда.

Если модель ARIMA имеет как несезонные (p, d, q), так и сезонные (P, D, Q) компоненты, она обозначается как SARIMA (p, d, q) (P, D, Q), где p, d, q - несезонные параметры; P, D, Q - сезонные.

### 5.1.2. Принцип расчета математической модели ARIMA

Для описания принципа расчета математической модели ARIMA анализа временных рядов используют следующие обозначения:

- $Y_t$  – анализируемый временной ряд;
- $U_t$  – пустая функция с нулевым средним значением и постоянной дисперсией;
- $d, D$  – степени нормальной и сезонной дифференциации;
- $\Phi_p(L)$  – полином порядка p авторегрессионной составляющей;
- $\Phi_P(L)$  – полином порядка P авторегрессионной сезонной составляющей;
- $\Theta_q$  – полином порядка q от компоненты скользящих средних;
- $\Theta_Q(L)$  – полином порядка Q сезонной составляющей скользящих средних;
- S – период функции, если она имеет сезонный характер.

#### *Авторегрессионная модель (AR)p*

В этой модели, описываемой уравнением (уравнение 5.1), текущее значение ряда выражается как функция значений, которые она принимала в p предыдущих выборках, взвешенных с коэффициентом  $\varphi$ , i, u:

$$\Phi_p(L) Y_t = u_t. \quad (5.1)$$

*Модель скользящего среднего (МА)<sub>p</sub>*

Стоит отметить, что значение стационарного ряда движется вокруг среднего значения. Более того, предполагается, что смещение в настоящее время вызвано бесконечными возмущениями, которые произошли в прошлом. Математическое описание модели скользящего среднего отражено в уравнении (5.2).

$$Y_t - \mu = \Theta_q(L) u_t. \quad (5.2)$$

*Модель ARMA (авторегрессионная скользящая средняя)*

Как показано в уравнении (5.3), эта модель представляет временной ряд как комбинацию двух предыдущих моделей:

$$\Phi_p(L) Y_t = \Theta_q(L) u_t. \quad (5.3)$$

*Модель ARIMA*

Некоторые ряды должны быть дифференцированы, чтобы устранить тенденции или изменение дисперсии и, таким образом, получить стационарный ряд. Модель ARIMA относится к модели ARMA, которая была применена к дифференцированной серии. Таким образом, мы имеем следующее представление модели:

$$\Phi_p(L)(1-L)^d(Y_t - \mu) = \Theta_q(L) u_t. \quad (5.4)$$

*Модель SARIMA*

Модель SARIMA, авторегрессионная и интегрированная с сезонной скользящей средней, основана на модели ARIMA с некоторыми коэффициентами, равными нулю, и дополнительными компонентами для интегрирования сезонного поведения ряда в модели. Модель SARIMA имеет следующие обозначения:

$$\Phi_p(L) \Phi_p(L) (1-L^s)^D(Y_t - \mu) = \Theta_Q(L)\Theta_q(L) u_t. \quad (5.5)$$

Для выбора описанных выше моделей использовалась методология Бокса-Дженкинса [139], которую можно свести к трем этапам: идентификация и выбор модели (стационарность, сезонность, авторегрессионные составляющие, скользящие средние); оценка коэффициентов, наилучшим

образом соответствующих выбранным параметрам, с помощью вычислительных алгоритмов; а также валидация полученной модели.

### 5.1.2.1. Анализ стационарности и сезонности

Временные ряды являются стационарными, если они не имеют трендовых или сезонных эффектов, а колебания данных происходят в пределах постоянного среднего значения, не зависящего от времени и дисперсии этих колебаний. Стационарный ряд (также называемый «процессом белого шума») легче анализировать, поскольку его можно смоделировать с меньшим количеством параметров. Анализ стационарности временного ряда проводился с использованием следующих графиков, полученных в GRETЛ (рис. 5.1).

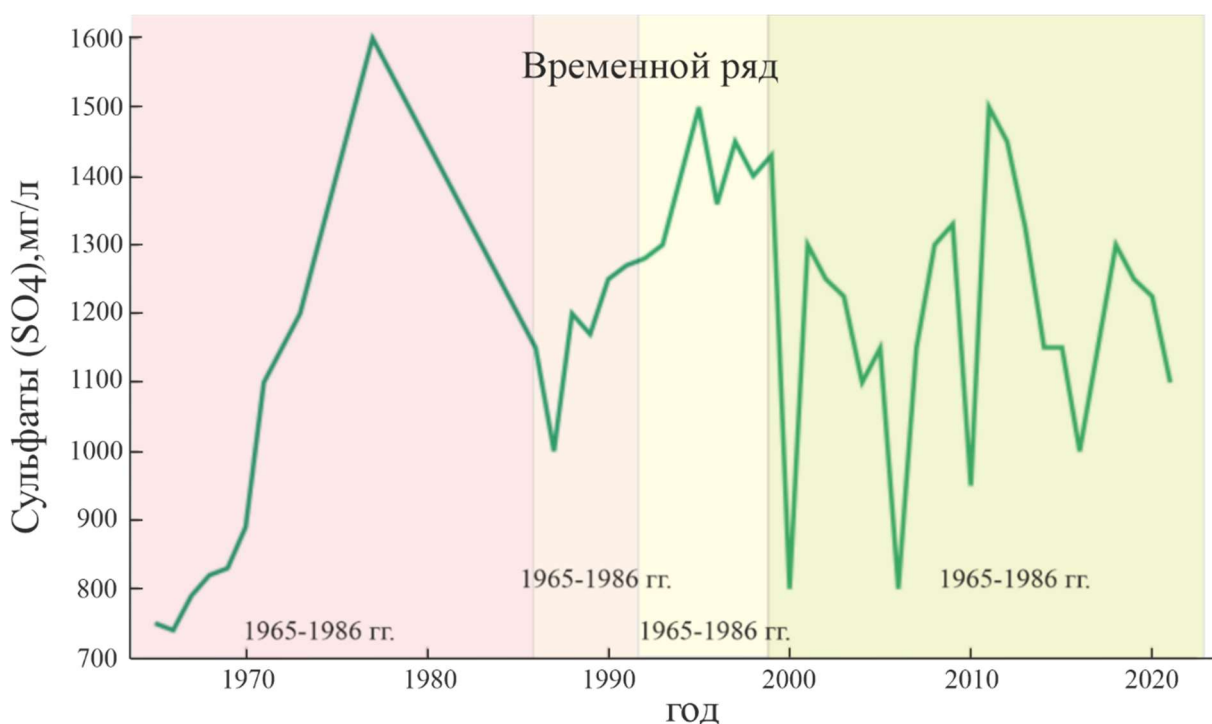


Рисунок 5.1. Ежегодный временной ряд концентрации сульфат-иона в подземных водах водозаборной скважины «Компрессормаш» с 1965 по 2022 год

Для примера анализа временного ряда использовались данные водозаборных скважин «Компрессормаш» с 1965 по 2021 год. Развитие Казани, как и всей страны, с 1971 по 1998 год было крайне нестабильным, сопровождалось частыми социально-экономическими и политическими кризисами (третья научно-техническая революция, период «перестройки» и

т.д). С 2000 года по настоящее время экологической составляющей уделено пристальное внимание экологов. Возобновление производства в стационарных условиях, появляются новые предприятия. На техногенных объектах применяют технологии очистительных сооружений. Графическое изображение исходного ряда (рис. 5.1) подтверждает наличие тенденции.

Стоит отметить, что самая ценная информация для прогнозных значений временного ряда - период с 1998 по 2022 год, так как период промышленной трансформации с 1965 по 1998 год в ближайшем будущем не повторится. Для дальнейшего анализа временных рядов используются данные XXI века (рис. 5.2).

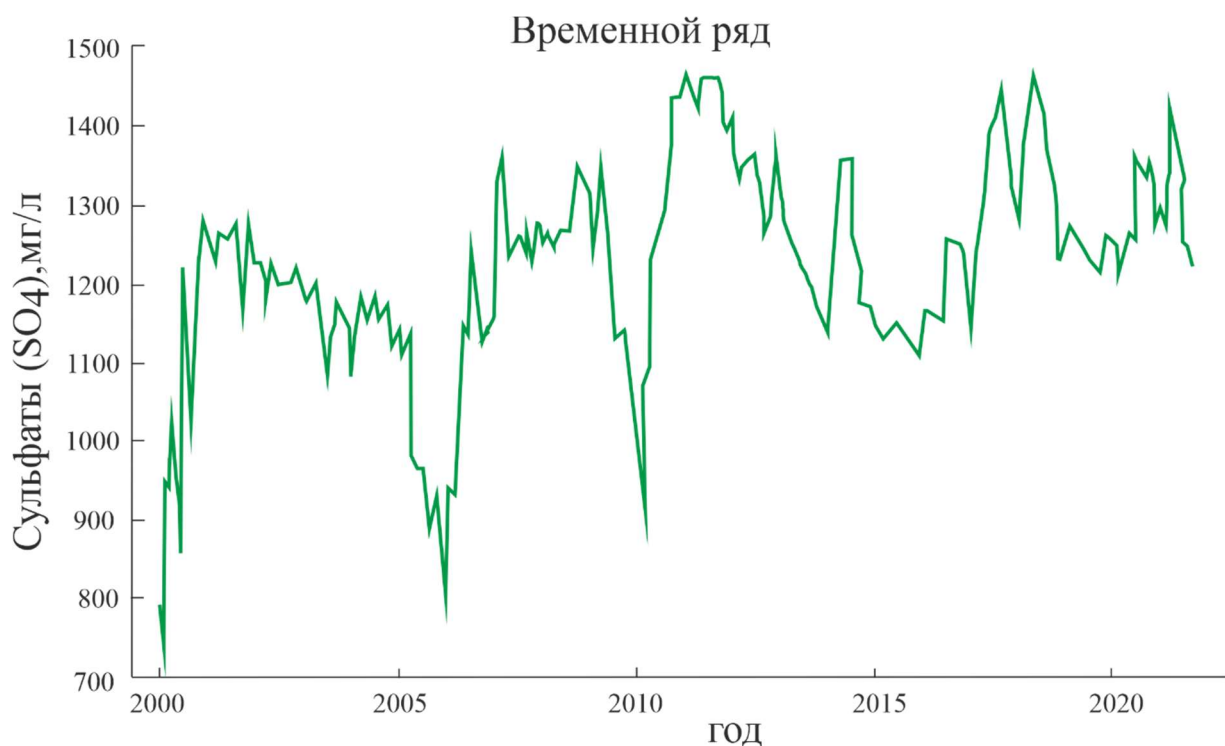


Рисунок 5.2. Ежемесячный временной ряд концентрации сульфат-иона в подземных водах водозаборной скважины «Компрессормаш» с 2000 по 2022 год

Предположение о стационарности в анализе данных временных рядов является фундаментальным. На рис. 5.2 видно, что временной ряд является нестационарным, однако для численного подтверждения доступно несколько методов проверки стационарности данных временных рядов: критерий KPSS (Kwiatkowski-Philips-Schmidt-Shin), Дики-Фуллера (ADF), тест Филиппса-Перрона. В данном диссертационном исследовании оценка стационарности



временного ряда была выполнена с использованием критерия KPSS, который выглядит следующим образом:

ряд:  $y = y_1, \dots, y_T$ ;

нулевая гипотеза:  $H_0$ : ряд  $y$  стационарен;

альтернатива:  $H_1$ : ряд  $y$  описывается моделью вида  $y_t = \alpha y_{t-1}$ ;

статистика:  $KPSS(y) = \frac{1}{T^2} \sum_{i=1}^T (\sum_{t=1}^i y_t)^2 / \lambda^2$ ;

$KPSS(y)$  при  $H_0$  имеет табличное распределение.

Если изначально временной ряд является нестационарным, существуют различные методы, с помощью которых можно преобразовать ряд в стационарный вид. Первый – это логарифмическое преобразование. Логарифмирование - частный случай преобразования Бокса-Кокса [142]:

$$y_t = \begin{cases} \ln y_t, & \lambda = 0 \\ (y_t^\lambda - 1)/\lambda, & \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

После построения прогноза трансформированного ряда необходимо преобразовать полученный прогноз с помощью уравнения 5.7:

$$\hat{y}_t = \begin{cases} \exp(\hat{y}'_t), & \lambda = 0 \\ (\lambda \hat{y}'_t + 1)^{\frac{1}{\lambda}}, & \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Иногда для достижения стационарности может потребоваться дифференцирование, где происходит переход исходного ряда в ряд попарных разностей его соседних значений:

$$y_1, \dots, y_T \rightarrow y'_2, \dots, y'_T, \quad (5.8)$$

$$y'_t = y_t - y_{t-1}.$$

Как видно из рис. 5.3, после первого дифференцирования произошла трансформация временного ряда: среднее значение не изменяется во времени, тренд отсутствует.

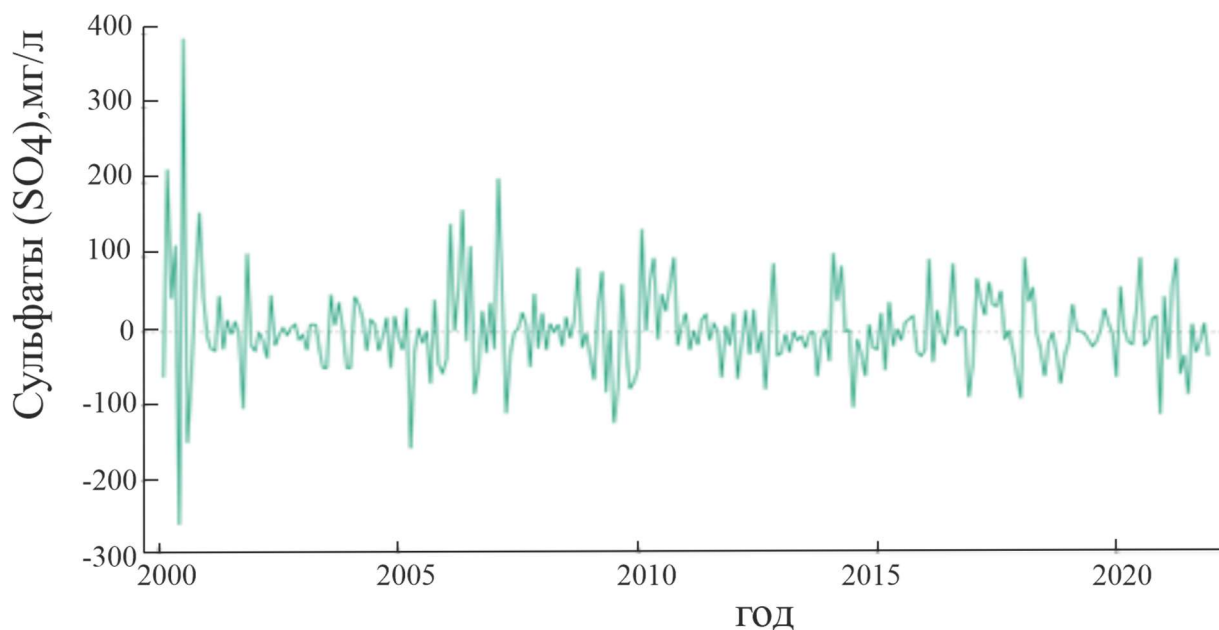


Рисунок 5.3. Продифференцированный временной ряд концентрации сульфат-иона в подземных водах водозаборной скважины «Компрессормаш» с 2000 по 2022 год

#### 5.1.2.2. Определение параметров модели

Для оценки коэффициентов использовалась программа GRETЛ, которая выполняла необходимые итерации по заданным значениям параметров  $p$ ,  $d$ ,  $q$ ,  $P$ ,  $D$ ,  $Q$  (параметры, полученные из функций автокорреляции и частичной автокорреляции для анализируемого временного ряда).

Для определения параметров сезонной составляющей ( $Q$ ,  $q$ ) модели ARIMA используют ACF (функция автокорреляции), [130] для порядка авторегрессионного оператора ( $P$ ,  $p$ ) - PACF (функция частичной автокорреляции), которые показаны на рисунке 5.4.

$Q^*S$  – номер последнего сезонного лага, при котором автокорреляция значима;  $q$ - номер последнего несезонного лага, при котором автокорреляция значима.

$P^*S$  – номер последнего сезонного лага, при котором частичная автокорреляция значима;  $p$  – номер последнего несезонного лага, при котором автокорреляция значима.

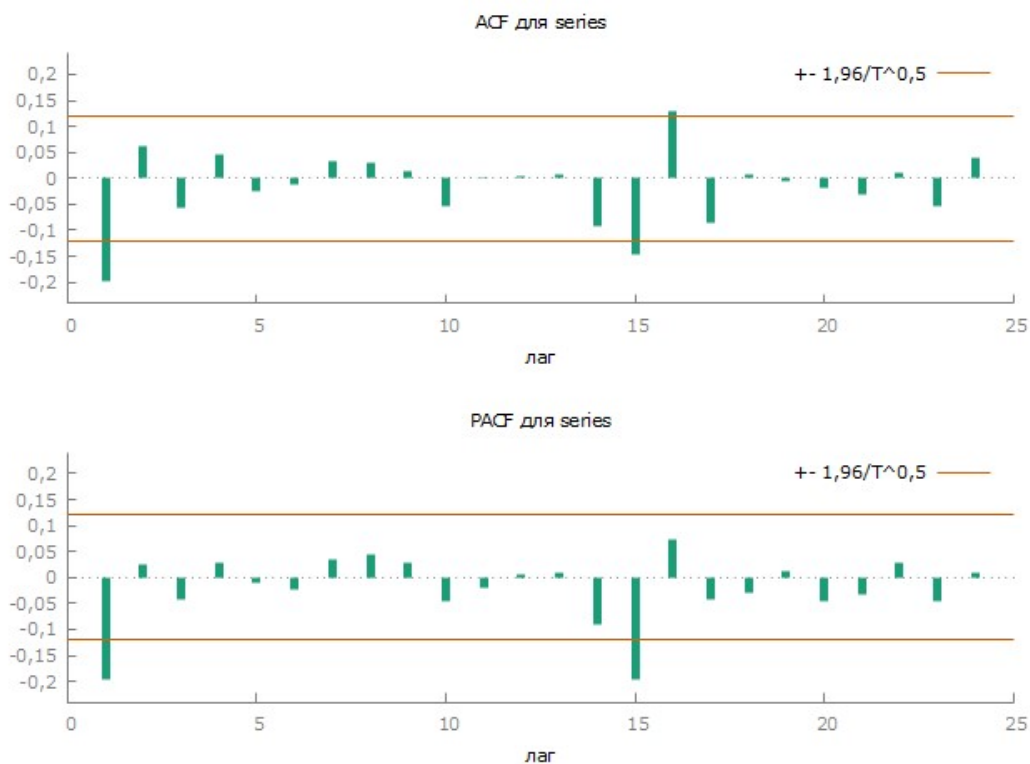


Рисунок 5.4. ACF (функция автокорреляции) и PACF (функция частичной автокорреляции)

Перебирая модели с  $D=1$ ,  $d=0$ , получаем наименьший AIC на ARIMA  $(1,0,0)*(0,1,0)$ . Прогноз для дополнительных данных в серии был сделан через GRETL с учетом доверительных интервалов, близких к 95%, как следует из рис. 5.5.



Рисунок 5.5. Динамика изменения концентрации сульфат-иона в водозаборной скважине «Компрессормаш», полученная в результате прогнозирования

При анализе надежности и валидации модели были получены

следующие данные:

- (1) Средняя ошибка: -0,011983
- (2) Среднеквадратическая ошибка: 59,837
- (3) Средняя абсолютная ошибка: 39,621
- (4) Средний процент ошибок: -0,1105
- (5) Средний процент абсолютной ошибки: 3,3081
- (6) Университет Тейла: 0,99775
- (7) Доля смещения, ДЕ: 0,00004157
- (8) Коэффициент возмущения, UD: 0,93046

## **5.2. Прогнозные карты химического состава подземных вод на основе ретроспективного анализа**

Прогнозные значения химического состава подземных вод включают пространственные и временные атрибуты. Применение ГИС (геоинформационная система) в сочетании с интегрированной моделью авторегрессии — скользящего среднего ARIMA обеспечивает мощный инструмент для прогнозирования антропогенного воздействия на исследуемой территории и управления водными ресурсами. Пространственно-временное моделирование является все более расширяющейся областью статистических исследований [143,140].

Учитывая объем информации, рассмотренной в нашем исследовании, использовалась версия 10.3 системы управления географическими базами данных «ArcGisMap», которая позволяет получать доступ, редактировать и манипулировать данными, используемыми в исследовании. Первым шагом в анализе пространственно-временных данных является анализ тенденции между исследуемыми значениями. Чтобы спрогнозировать концентрацию ионов пространственного распределения на исследуемой территории, мы использовали интерполяционный геостатистический метод Кригинга. Метод представляет собой интерполяцию, с его помощью прогнозируются неизмеренные значения по области исследования путем вычисления

средневзвешенного значения наблюдаемых величин в окрестностях неизвестного поля. Его математическое описание отражено в формуле (5.9):

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i), \quad (5.9)$$

где  $\hat{z}(x_0)$  — местоположение прогноза  $x_0$ ;  $n$  — количество наблюдений;  $Z(x_i)$  — измеряемое значение в местоположении  $x_i$ ;  $\lambda_i$  — вес кригинга с определенными требованиями:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad (5.10)$$

Где  $\lambda_i$  зависят от установленной модели вариограммы для установленных точек, от расстояния до местоположения прогноза и пространственных отношений между значениями вблизи от местоположения прогноза.

Для выявления трендов изменения состава подземных вод впервые проведен ретроспективный анализ с возможностью прогнозирования гидрохимических проб неогенового и нижнеказанского комплексов города Казани за период 1960–2030 годов.

Таблица 5.1. Средние содержания основных компонентов подземных вод Казани в разные временные периоды

Компонент, единица измерения	Водоносные комплексы, периоды наблюдений					
	Неогеновый			Нижнеказанский		
	1960– 1970	2020–2022	2030	1960– 1970	2020– 2022	2030
SO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	134,28	126,8	131,5	428,3	258,3	320,1
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	4,7	11,6	14,8	6,2	13,4	16,3
Fe <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,68	0,29	0,24	0,19	0,26	0,20
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	3,07	8,42	12,1	1,90	10,50	14,7

Для сравнительного анализа тенденций в поведении компонентов с помощью гидрохимических моделей данные по городским скважинам, эксплуатирующим воды неогенового и нижнеказанского комплексов, разделены на 3 периода: первый включает результаты 1960-1970 гг., второй - 2020-2022 гг., третий - 2030 г. Сравнение значений химических компонентов

по периодам показало следующее (см. табл. 5.1).

**Общее железо.** На территории Казани имеются примеры самоочищения техногенно преобразованных подземных вод неогенового и нижнеказанского комплексов. Так, максимальная концентрация железа ( $233 \text{ мг/дм}^3$ ) была зафиксирована в конце XX века на водозаборе ТПО «Свияга» КЭТЗ. В настоящее время водозабор не работает, а концентрация железа снизилась до  $20 \text{ мг/дм}^3$ , что свидетельствует о возможности природной реабилитации подземных вод. Однако период полного восстановления природных кондиций может составить очень продолжительный отрезок времени. Область развития подземных вод с концентрациями, превышающими фоновые значения, ионов железа в XX веке отмечались в южной и юго-восточной (промышленной) зоне. Отмечена вертикальная взаимосвязь между разноуровневыми гидростратиграфическими подразделениями, образующими гидрохимическую аномалию с повышенным содержанием железа – «железное окно» в виде вертикального цилиндра (рис.5.6).

К 2030 году намечается сокращение площади «зараженных» железом подземных вод, что, возможно, связано с непостоянной эксплуатацией водозаборных скважин промышленных предприятий в последние годы в связи с сокращением производственных мощностей и природной реабилитацией подземных вод.

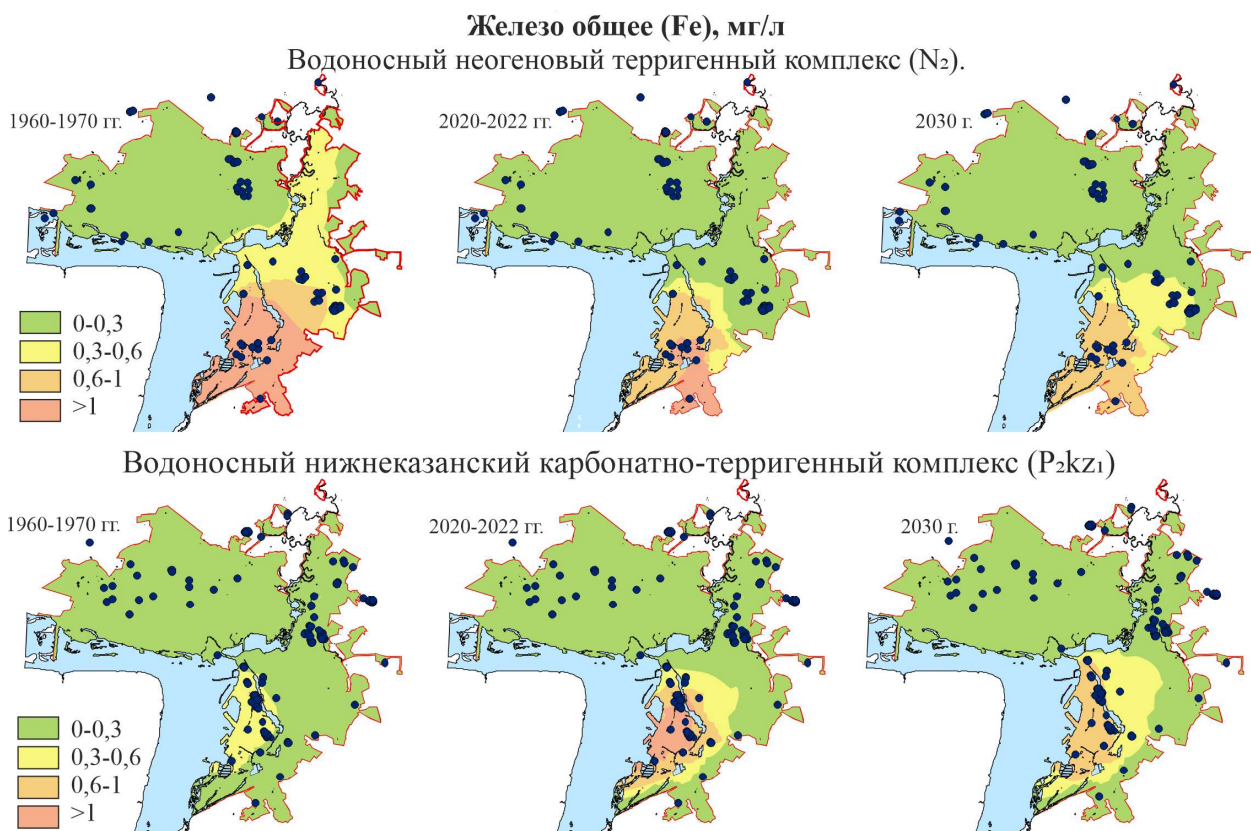


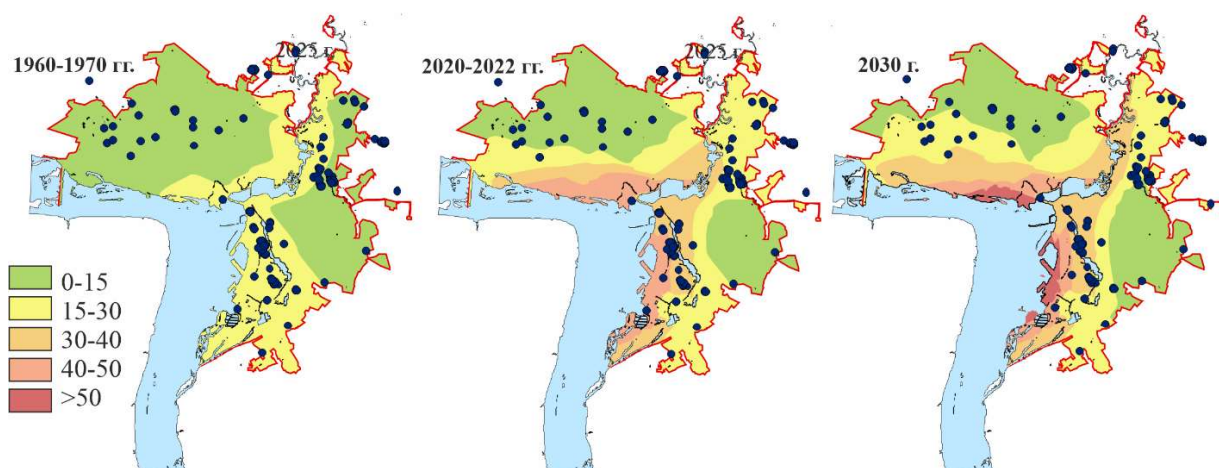
Рисунок 5.6. Карты изменения содержания общего железа в подземных водах неогенового и нижеказанского комплекса

**Хлориды.** Другая тенденция выявляется для хлор – иона в водах рассматриваемых гидрогеологических комплексов. Хлориды нехарактерны для вод нижеказанского комплекса (от первых до 42 мг/дм<sup>3</sup>), хотя тенденция их увеличения в последние десятилетия проявилась достаточно отчетливо (рис. 5.7). Область развития подземных вод с хлоридным следом приурочена к исторической части Казани; вторая зона расположена в районе старой жилой застройки и промышленных предприятий Авиастроительного района. Превышения нитрат-иона в подземных водах отмечаются в центральной части города – возле озера Нижний Кабан и протока Булака.

Содержания хлора в рассматриваемых гидрогеологических комплексах прямо зависят от мощности кайнозойских отложений, а также от состава перекрывающих пород (рис. 5.7). Именно здесь расположены «гидрогеологические окна», в которых с глубиной содержания Cl<sup>-</sup> в подземных водах уменьшаются.

## Хлориды (Cl), мг/л

Водоносный неогеновый терригенный комплекс (N<sub>2</sub>).



Водоносный нижеказанский карбонатно-терригенный комплекс (P<sub>2</sub>kz<sub>1</sub>)

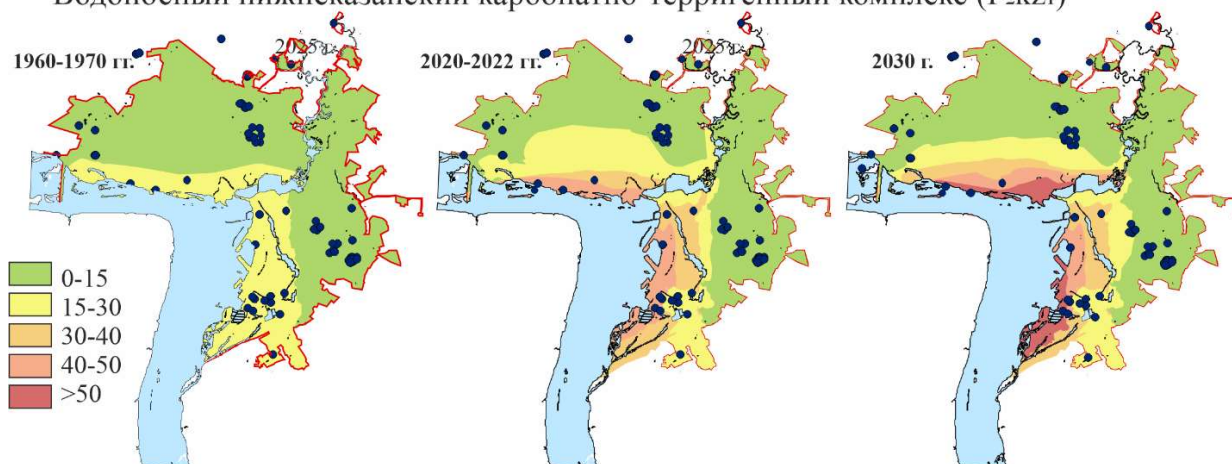


Рисунок 5.7. Карты изменения содержаний хлор-иона в подземных водах неогенового и нижеказанского комплекса

Проникновение техногенного загрязнения с земной поверхности в воды нижеказанского комплекса отмечается на участках, где кайнозойские осадки представлены проницаемыми аллювиально-озерными песками и супесями – в самой низменной части Казани между системой озер Кабан и Куйбышевским водохранилищем. К 2030 году намечается увеличение концентрации хлорид-ионов, значения которых будут достигать ПДК (более 50 мг/дм<sup>3</sup>).

**Нитраты.** Относительное беспокойство может вызывать увеличение концентраций нитратов – от средних значений 0,43 мг/дм<sup>3</sup> в первый период до 9,37 мг/дм<sup>3</sup> во второй период (рис. 5.8). Содержания нитратов превышают ПДК 45 мг/дм<sup>3</sup> в более 10% скважин. Нитраты обладают неравномерным и точечным распределением, связанным с локальными объектами загрязнений: околоствольные пространства гидрогеологических скважин, свалки и др.



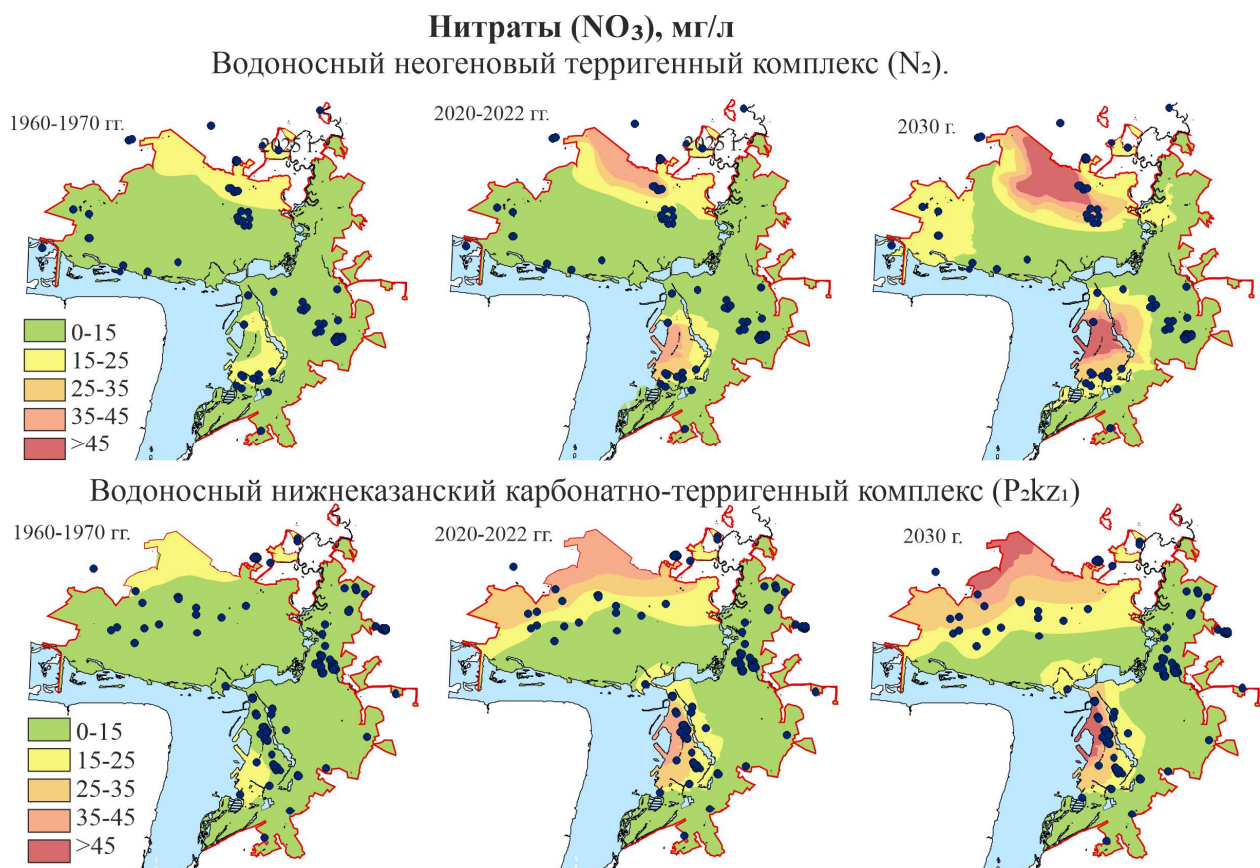


Рисунок 5.8. Карты изменения содержания нитратов в подземных водах неогенового и нижеказанского комплекса

Предположительно, тенденция увеличения нитратов обусловлена недостаточной очисткой коммунально-бытовых стоков, которые проходят через мощный естественный фильтр пород, перекрывающих неогеновый и нижеказанский комплексы, и только через десятилетия могут достигать водоносных горизонтов.

**Сульфаты.** Для сульфат – иона нижеказанского комплекса характерны колебания значений от первых десятков до 560 мг/дм<sup>3</sup> (при ПДК 500 мг/дм<sup>3</sup>). Высокие концентрации сульфат-иона (более 500 мг/дм<sup>3</sup>) зафиксированы в нижеказанском водоносном горизонте в долине реки Казанка и в районе озера Кабан. Стоит отметить, что растворы сульфатных солей относятся к очень стойким и медленно распадающимся соединениям: время их распада составляет десятки и сотни лет.

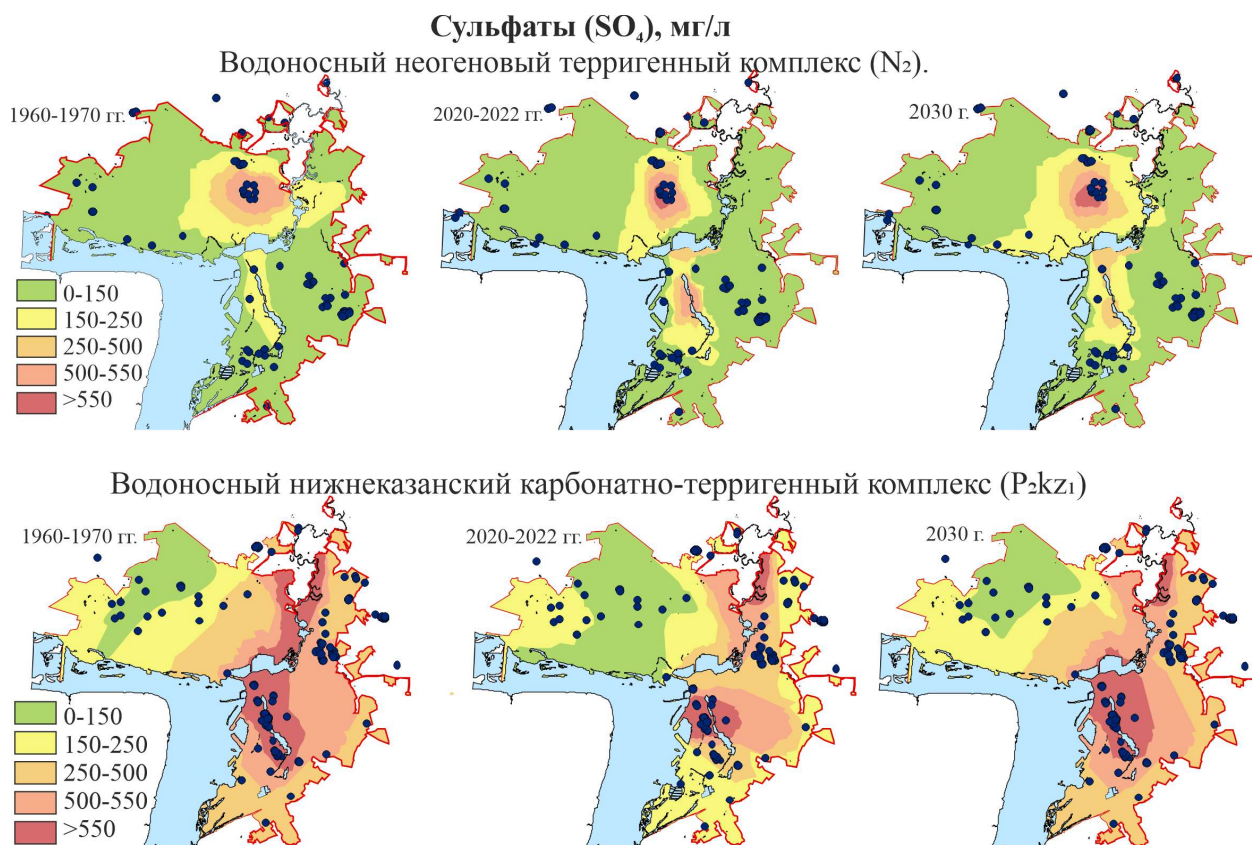


Рисунок 5.9. Карты изменения содержания сульфатов в подземных водах неогенового и нижнеказанского комплекса

Поведение сульфат-иона за полувековой период (с 1960 до 2022 года) носит нестабильный характер. Заметна тенденция уменьшения в XXI веке области сульфатных вод в центральной и южной частях Казани при одновременном уменьшении сульфат-иона на правобережье р. Казанки. Намечается тенденция повышения его содержания к 2030 году в центральной (исторической) и южной (промышленной) частях города (рис. 5.9). Следует учитывать, что растворы сульфатных солей в нижнеказанском водоносном комплексе имеют не только техногенный, но и природный генезис, водовмещающими породами подземных вод там служат загипсованные известняки и доломиты.

Тренд распределения компонентов за период с 1960 по 2030 год. в основных водоносных комплексах показал, что неогеновый комплекс по содержанию сульфатов значительно превосходит пермские комплексы.

Прогнозы распределения природно-техногенных компонентов в водах неогенового и нижнеказанского водоносных комплексов, сделанные с

помощью моделирования временных рядов, показали, что в будущем произойдет увеличение всех исследуемых компонентов (сульфат, хлор, нитрат), за исключением содержания иона железа, которое уменьшится. Поведение сульфат-иона носит нестабильный характер, так как на поведение его концентрации влияет как природный, так и техногенный фактор.

Таким образом, точное прогнозирование техногенных компонентов в подземных водах является основой для принятия решений при контроле качества воды, и устранении инцидентов, связанных с качеством воды. Поэтому исследования различных методов прогнозирования изменения природно-техногенных компонентов имеют важное теоретическое и практическое значение.

## ГЛАВА 6. КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРОДА КАЗАНИ

Условия риска загрязнения одного и того же водоносного горизонта будут различными в зависимости от характера сброса загрязняющих веществ на поверхность земли и их последующей фильтрации в водоносный горизонт. Поэтому оценка риска загрязнения подземных вод должна учитывать как природные (природная защищенность первого от поверхности водоносного горизонта от техногенного загрязнения, уклон земной поверхности, площадная закарстованность территории), так и техногенные факторы (удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), суммарный показатель загрязнения почв (СПЗ), нарушенный гидродинамический режим подземных вод).

Вес различных факторов для оценки степени риска загрязнения подземных вод оценивался на основе факторного анализа. Факторный анализ позволяет выявить зависимость между гидрохимическими данными для исследования статистически связанных признаков с целью выявления определенного числа скрытых (внутренних) причин, формирующих специфику изучаемого явления. С помощью факторного анализа определяется мера связи между параметрами, и выявляются обобщенные факторы, лежащие в основе изменений характеристик. Целью подобного анализа выступает выражение большого числа рассматриваемых параметров через меньшее число более емких внутренних характеристик явления (метод главных компонент). Факторные веса представляют собой количественные значения выделенных факторов для каждого из имеющихся объектов, определяют изменчивость данных, т. е. изменчивость статистических корреляций. Чем выше факторный вес, тем больше от него зависят корреляции между соответствующими фактами.

Из данных таблицы 6.1. видно, что степень воздействия рассматриваемых факторов на геохимический состав подземных вод различная. К первостепенным факторным нагрузкам относятся природные и

техногенные факторы, количественный вес которых варьирует от 36,6 до 44,3 %. К второстепенному фактору можно отнести нарушенный гидродинамический режим подземных вод (вес фактора 12,84 %).

Таблица 6.1. Факторные нагрузки для компонентов первого от поверхности водоносного горизонта

Компонент	«Природный»			«Техногенный» фактор		
	Природная защищенность ГВ	Уклон земной поверхности	Карстовые процессы	УКИЗВ	СПЗ	Нарушенный гидродинамический режим
Водородный показатель	0,13	-0,21	-0,28	0,16	-0,08	-0,29
Минерализация	<b>0,70</b>	<b>0,96</b>	<b>0,76</b>	<b>0,80</b>	0,57	0,24
Жесткость общая	<b>0,75</b>	0,55	0,05	0,2	0,23	0,03
Окисляемость перманганатная	-0,13	0,44	0,32	0,16	-0,50	0,19
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> )	0,25	0,11	0,09	0,01	-0,59	0,19
Хлориды (Сl)	<b>0,90</b>	<b>-0,79</b>	-0,59	<b>-0,71</b>	0,48	<b>0,63</b>
Сульфаты (SO <sub>4</sub> )	0,36	0,27	0,27	0,52	0,32	0,33
Нитраты (NO <sub>3</sub> )	<b>0,87</b>	<b>-0,72</b>	<b>-0,78</b>	<b>-0,76</b>	<b>-0,93</b>	-0,53
Натрий, калий, суммарно (Na+K)	0,13	0,56	<b>0,86</b>	<b>0,82</b>	<b>-0,84</b>	<b>0,84</b>
Кальций (Ca)	<b>0,81</b>	-0,38	-0,35	-0,26	0,54	-0,17
Магний (Mg)	<b>0,79</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	<b>0,75</b>	<b>0,79</b>	0,15
Аммоний (NH <sub>4</sub> )	-0,52	<b>0,73</b>	<b>0,93</b>	<b>0,71</b>	<b>-0,85</b>	0,07
Железо общее (Fe)	0,01	-0,23	<b>-0,73</b>	-0,54	0,50	0,55
<b>Вес фактора, %</b>	<b>41,20</b>	<b>40,48</b>	<b>38,46</b>	<b>44,3</b>	<b>36,6</b>	<b>12,84</b>

Примечание: красным цветом выделены значимые нагрузки отдельных компонентов в факторах

**Карта природной защищенности водоносного горизонта от техногенного загрязнения.** Методика Гольдберга использует четыре расчетные карты: мощность, литологический состав пород зоны аэрации, фильтрационные свойства, глубина залегания грунтовых вод. Сумма баллов определяет степень природной защищенности грунтовых вод.

Максимальная мощность зоны аэрации на исследуемой территории не превышает 30 м (рис.6.1), поэтому выделяют три градации глубин залегания

грунтовых вод (в м): до 10, 10–20, 20–30. Разбалловка глубин приведена в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Градации глубин залегания грунтовых вод

Глубина, м	Баллы
До 10	1
10-20	2
20-30	3

Этот фактор имеет решающее значение, поскольку мощность зоны аэрации определяет потенциальное расстояние переноса загрязняющих веществ в процессе инфильтрации воды с поверхности земли. Расчет определяется как расстояние (в метрах) от поверхности земли до уровня грунтовых вод в определенной точке (водозаборная скважина).

По литологическим и фильтрационным свойствам слабопроницаемых отложений выделяют три группы (табл.6.3).

Таблица 6.3. Литологические группы зоны аэрации

Литологические группы	Породы	Коэффициент фильтрации, м/сут.
а	Супеси, суглинки легкие	0,1–0,01
б	Смесь пород группы «а» и «с»	0,01–0,001
с	Тяжелые суглинки и глины	< 0,001

К слабопроницаемым породам относятся отложения, коэффициент фильтрации которых менее 0,1 м/сут. Такие значения обычно присущи супесям, глинистым пескам, легким суглинкам; тяжелые суглинки и глины характеризуются меньшими значениями коэффициента фильтрации - порядка  $10^{-3}$  м/сут. и менее.

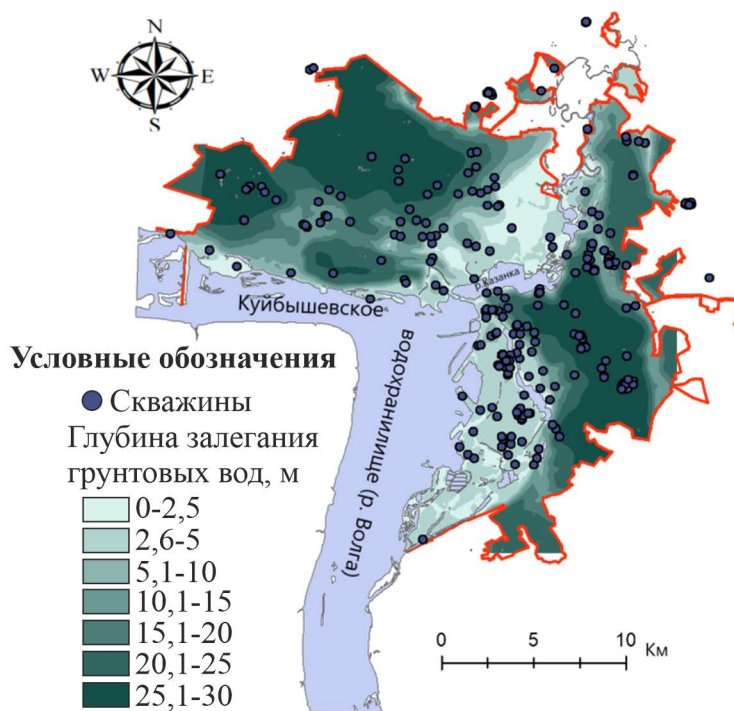


Рисунок 6.1. Карта глубин грунтовых вод на территории города Казани

Пример расчета  $\Sigma$ баллов для определения категории условий защищенности первого от поверхности водоносного горизонта представлены на рис. 6.2.

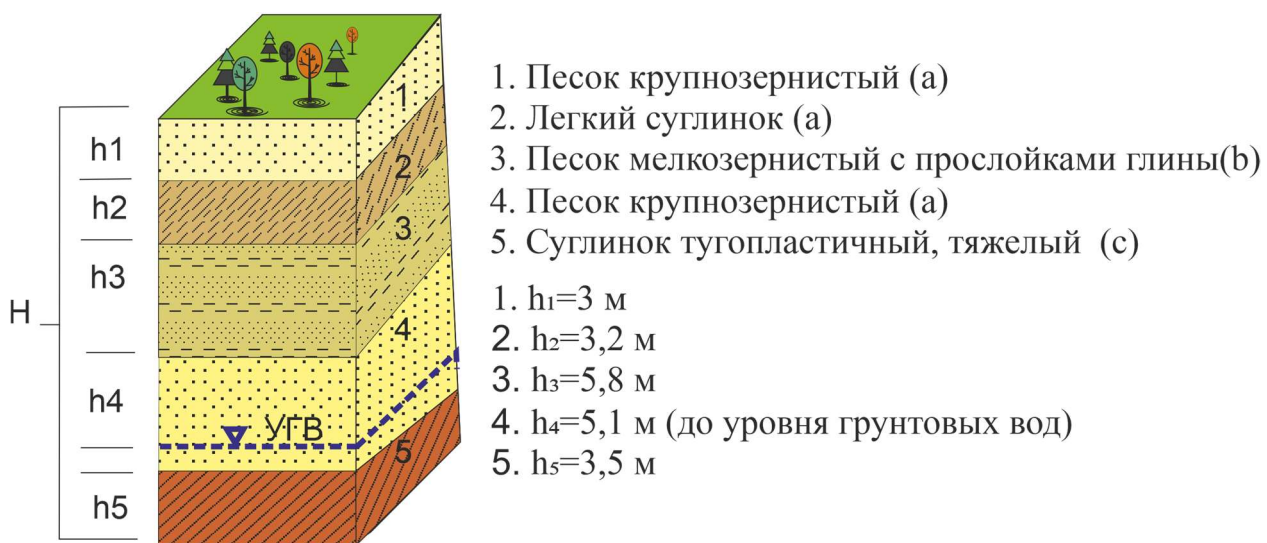


Рисунок 6.2. Расчет суммы баллов для определения категории условий защищенности первого от поверхности водоносного горизонта

$N=17,1$  м ( $10 < N \leq 20$ ) 2 балла,

- 1) литологическая группа: **a**;  $h_1=3$  ( $2 < m_0 \leq 4$ ) 2 балла,
- 2) литологическая группа: **a**;  $h_2=3,2$  ( $2 < m_0 \leq 4$ ) 2 балла,
- 3) литологическая группа: **b**;  $h_3=5,8$  ( $4 < m_0 \leq 6$ ) 4 балла,
- 4) литологическая группа: **a**;  $h_4=5,1$  ( $4 < m_0 \leq 6$ ) 3 балла,
- 5) литологическая группа: **c**;  $h_5=3,5$  ( $4 < m_0 \leq 6$ ), 0 баллов

$\Sigma$ баллов= 11 (III категория защищенности).

Для территории Казани автором диссертации выделены 4 категории условий защищенности подземных вод от техногенного загрязнения (табл. 6.4). Неблагоприятными являются условия, соответствующие русловому, пойменному и старичному аллювию рек Волга и Казанка (I категория, сумма баллов менее 10). Условно благоприятная обстановка (II категория, сумма баллов 10–15) характерна для нижних частей склонов речных долин, аллювия первой и второй надпойменных террас Волги. Умеренно благоприятная обстановка (III категория, сумма баллов 15–20) отвечает верхней части склонов речных долин, аллювию четвертой и третьей надпойменных террас Волги. Наиболее благоприятными являются условия приводораздельных

участков и водоразделов (IV категория, сумма баллов более 20).

Таблица 6.4. Типизация природных условий защищенности подземных вод от техногенного загрязнения для г. Казани

Категории условий защищенности	Сумма баллов	Литологический состав зоны аэрации	Распространение	Условия природной защищенности подземных вод	Индекс
I	до 10	Пески, гравий, супеси, суглинки, глины	Русловой, пойменный и старичный аллювий рек Волга, Казанка и их притоков	Незащищенные	4
II	10-15	Супеси, легкие суглинки	Нижняя часть склонов речных долин, аллювий первой и второй надпойменных террас Волги	Слабо защищенные	3
III	15-20	Легкие суглинки, суглинки	Верхняя часть склонов речных долин, аллювий четвертой и третьей надпойменных террас Волги	Относительно защищенные	2
IV	более 20	Тяжелые суглинки, глины	Приводораздельные участки, водоразделы	Защищенные	1

При интегральной оценке геоэкологического состояния гидросферы установлен традиционный зональный характер условий природной геологической защищенности подземных вод от техногенного загрязнения: в речных долинах — незащищенные, на склонах и водоразделах — слабо защищенные и относительно защищенные. Анализ компьютерной модели защищенности подземных вод полностью подтвердил подобную зональность для территории города Казани (рис. 6.3).

Условия, которые относятся к незащищенным подземным водам, соответствуют русловому, пойменному и старичному аллювию рек Волга и Казанка (сумма баллов менее 8). Слабозащищенные подземные воды (сумма баллов 8–13) характерны для нижних частей склонов речных долин, аллювия первой и второй надпойменных террас Волги.



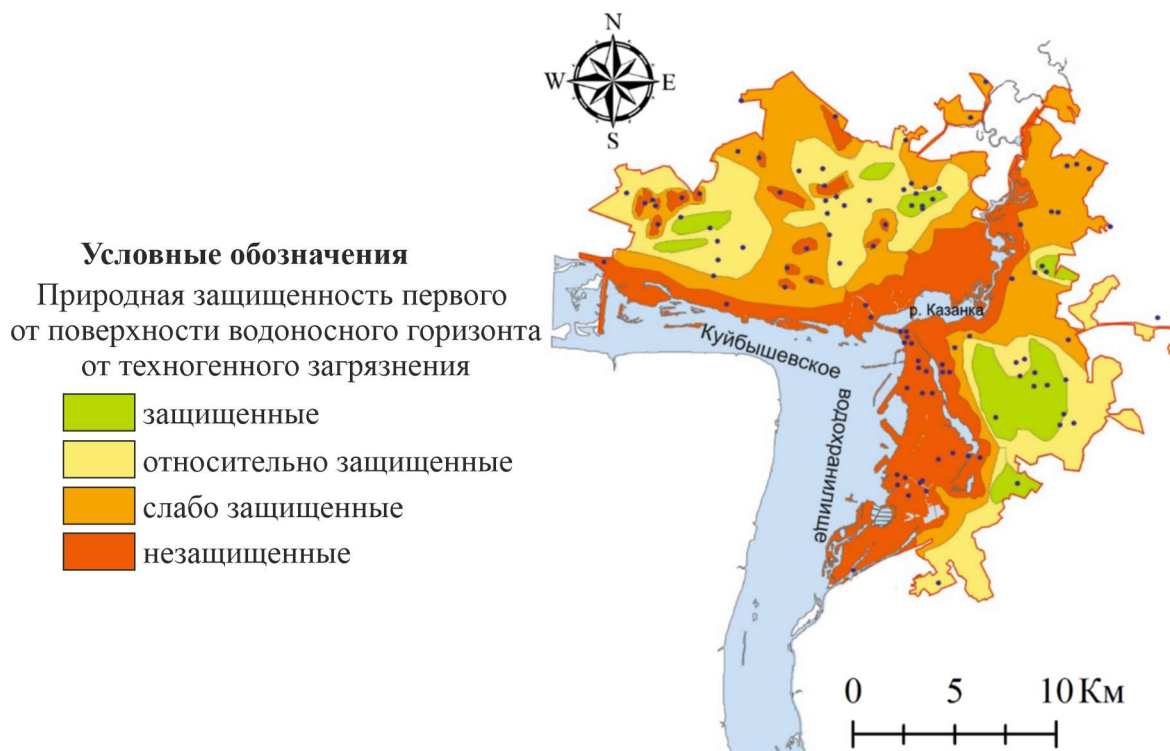


Рисунок 6.3. Карта защищенности подземных вод г. Казани от техногенного загрязнения

*Расшифровку категорий условий защищенности см. табл. 6.3. Точки – водозаборные скважины*

Более 50 % исследуемой территории приходится на участки с высокой и весьма высокой степенью риска загрязнения подземных вод. Относительно защищенные условия (сумма баллов 13–18) отвечают верхней части склонов речных долин, аллювию четвертой и третьей надпойменных террас Волги. Наиболее защищенными являются условия приводораздельных участков и водоразделов (сумма баллов более 18–22), которые занимают около 10 % городской территории.

**Карта уклона земной поверхности.** Влияние рельефа на уязвимость грунтовых вод к техногенезу обусловлено несколькими показателями. Прежде всего, это уклон земной поверхности, который может быть индикатором времени пребывания загрязняющего вещества на поверхности земли. На более пологих участках, где значения уклона от 0 до 5 %, атмосферные воды, подвергшиеся техногенному загрязнению, остаются на поверхности земли длительный промежуток времени, что в дальнейшем способствует инфильтрации поверхностных вод в грунтовые.

На рис. 6.4 показан уклон рельефа на территории города Казани.

Таблица 6.5. Уклон рельефа на территории города Казани

Уклон поверхности, %	Индекс
7,1-9	1
5,1-7	2
3,1-5	3
0-3	4

Уклон поверхности изучаемой области был получен из ЦМР (цифровая модель рельефа). Автор диссертации классифицировал уклон по четырем различным категориям (табл. 6.5).

Результат показывает, что уклон исследуемой территории находится в диапазоне 0–9%. Около 80% изучаемой территории занято пологими склонами (0–5%), т. е. имеющими высокие рейтинговые значения.

**Карта карстовых процессов.** Карст играет важную роль в инфильтрации загрязняющих веществ в водоносный горизонт. В северной части города карстовые процессы возникают в результате выщелачивания доломит-гипс ангидритовых толщ сакмарского яруса. Стоит отметить, что для пород сульфатного состава свойственно образование полостей, нежели дезинтегрированной мукообразной массы. Обусловлено это тем, что пустоты в сульфатных породах в виде трещин, как правило, образуются в тех частях геологических структур, где горные породы находятся в значительно напряженном состоянии (разломы, шарниры складок). Вследствие чего в доломит-гипс ангидритовых толщах происходит трещинная циркуляция подземных вод, приводящая к образованию протяженных подземных каналов и пещер. В центральной и юго-восточной части города Казани растворение

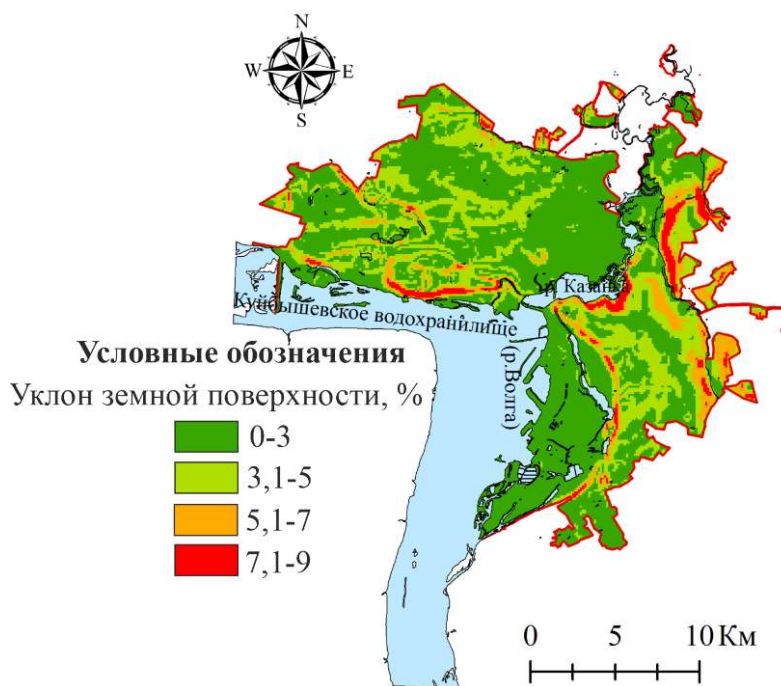


Рисунок 6.4. Карта уклона поверхности на территории города Казани

происходит в доломитах и известняках в основном в породах возраста верхней перми, что приводит к обрушению вышележащих горных пород.

Широкое развитие карста связано прежде всего с обширными площадями распространения растворимых пород и тектонической трещиноватости.

Загрязнение, вызванное деятельностью человека, может легко транспортироваться через поверхностный сток в подземные воды.

Карстовые явления характерны в целом для всей территории Казани. Провальные воронки и котловины встречаются на всех террасах, склонах и днищах долин, балок, оврагов.

Районами интенсивного карста являются правый склон долины реки Нокса, левый склон долины реки Казанка, высокая терраса Волги у западной и южной окраины города. В таблице 6.6 приведена характеристика площадной закарстованности территории карстовыми процессами по степени площадного распространения.

Таблица 6.6. Критерии карстовых процессов на территории города Казани

Характеристика площадной закарстованности территории	Коэффициент площадной закарстованности	Индекс
слабая	<0,1	1
средняя	0,1-0,25	2
сильная	0,25-0,5	3
очень сильная	>0,5	4

На рис. 6.5 показана карта карстовых процессов исследуемой

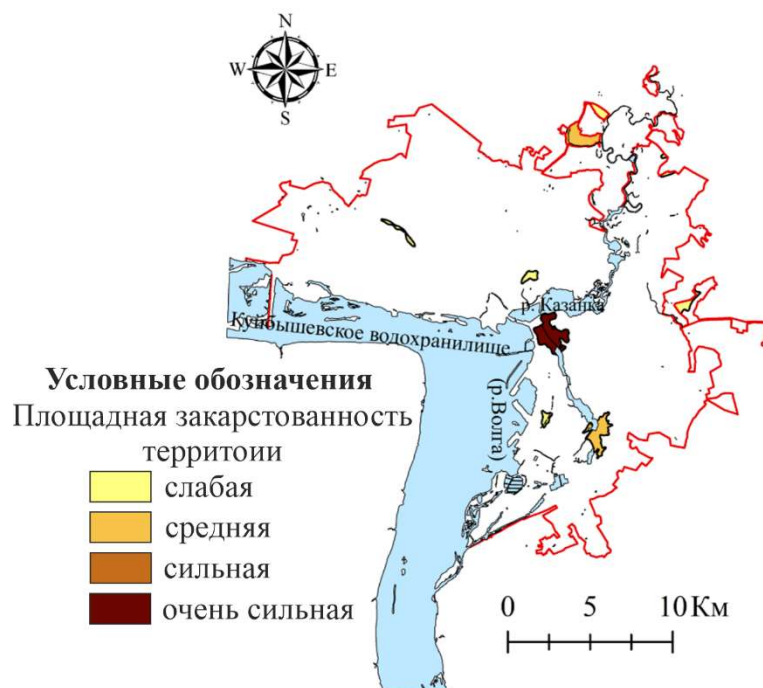


Рисунок 6.5. Карта карстовых процессов на территории города Казани

территории. На карстовые районы приходится 7–12 % площади города Казани.

**Удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ).** Для комплексной геоэкологической модели автором диссертации использовался метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод. Удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) определяет качество воды, она отражает совокупное влияние как для питьевого, так и для культурно-бытового водопользования. Классификация качества воды, проведенная на основе значений УКИЗВ (табл. 6.7), позволило разделить поверхностные воды города

Казани на 5 классов в зависимости от степени их загрязненности. Большому значению индекса соответствует худшее качество воды. Расчеты УКИЗВ для поверхностных вод города Казани показали, что большинство проб относятся к категории «грязные» (4 «б» класса) и очень загрязненные (3 «а» класса) (табл. 6.8).

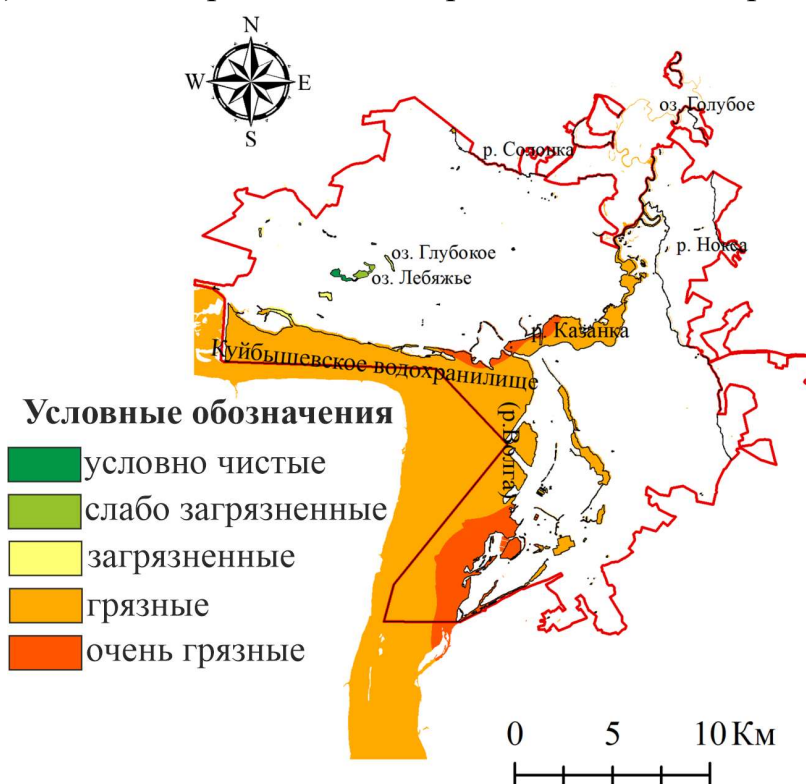


Рисунок 6.6. Карта удельного комбинаторного индекса загрязнения вод на территории города Казани

Таблица 6.7. Критерии удельной величины комбинаторного индекса загрязнения воды

Характеристика состояния загрязненности воды	УКИЗВ	Индекс
условно чистые	1	1
слабо загрязненные	1,1-2	2
загрязненные и очень загрязненные	2,1-4	3
грязные	4,1-8	4
очень грязные	8,1-11	5

Интерполяция УКИЗВ средних значений поверхностных вод на

территории города Казани (рис. 6.6) иллюстрирует качество поверхностных вод на основе расчета УКИЗВ за период опробования (2014–2020 года).

Наибольшую долю в общую оценку степени загрязненности воды вносили сульфаты, нефтепродукты, соединения меди, ХПК, БПК<sub>5</sub>, азота нитритного, загрязненность по которым оценивается как «характерная». Среднегодовые и максимальные концентрации составили: сульфатов - 6,0 и 7,5 ПДК, БПК<sub>5</sub>- 1,4 и 3,2 ПДК, азота аммонийного - 1,6 и 9,5 ПДК, азота нитритного - 1,2 и 2,4 ПДК, соединений меди - 3,3 и 17,0 ПДК, марганца - 2,6 и 10,0 ПДК, нефтепродуктов - 2,6 и 5,6 ПДК, железа общего - 1,2 и 7,2 ПДК, летучих фенолов - 1,4 и 3,0 ПДК. Кроме того, зафиксированы превышения ПДК соединений цинка до 3,0 раз, никеля - до 5,4 раза.

Таблица 6.8. Уровень загрязнения поверхностных вод по комплексным оценкам

Водный объект	УКИЗВ	Класс качества
Куйбышевское водохранилище (р. Волга)	4,3-3,21	4 «а» грязные - 3 «б» очень загрязненные
р. Казанка	3,99-3,22	4 «а» грязные - 3 «б» очень загрязненные
р. Солонка	3,05	3 «б» очень загрязненные
р. Сухая река	3,18	3 «б» очень загрязненные
р. Киндерка	3,01	3 «б» очень загрязненные
р. Нокса	3,15	3 «б» очень загрязненные
оз. Кабан	3,22	3 «б» очень загрязненные
оз. Лебяжье	1,2	2 слабо загрязненные

**Суммарный показатель загрязнения почв (СПЗ).** Почвенные среды играют существенную роль в комплексной геоэкологической оценке территории. Высокие значения, полученные в некоторых выборках, связаны в первую очередь с выбросами токсических веществ транспортными средствами и интенсификацией промышленного производства.

Уровень СПЗ зависит от содержания свинца, цинка и меди в почве, поскольку именно эти элементы являются приоритетными ЗВ в почвенном покрове города.

Суммарный показатель загрязнения (СПЗ) почв рассчитывался как сумма превышений концентраций ТМ в почвах над геохимическим фоном. Классификация загрязненности почв представлена в табл. 6. 9. Относительно чистыми можно назвать северо-западные и юго-восточные

районы города Казани, а его центральная часть и частично северо-западный участок отнесены к категории «высокая» степень загрязнения (рис.6.7).

**Условные обозначения**

Характеристика состояния загрязнения почв

- очень низкая
- низкая
- средняя
- высокая

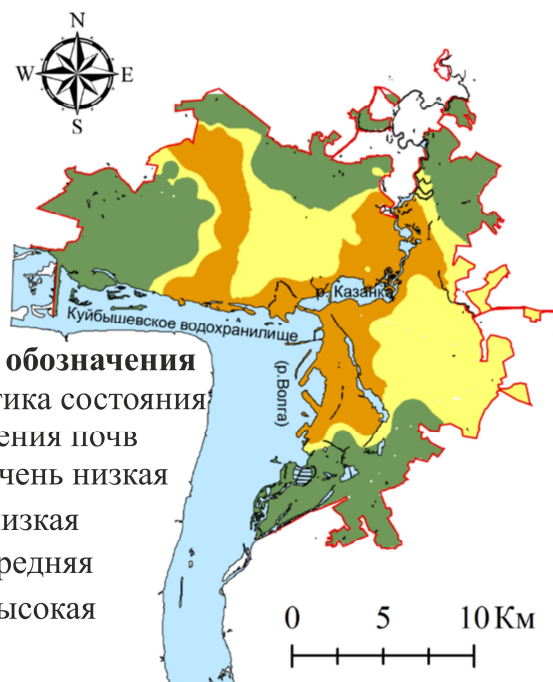


Рисунок 6.7. Карта суммарного показателя загрязнения почв на территории города Казани

Таблица 6.9. Критерии суммарного показателя загрязнения почв

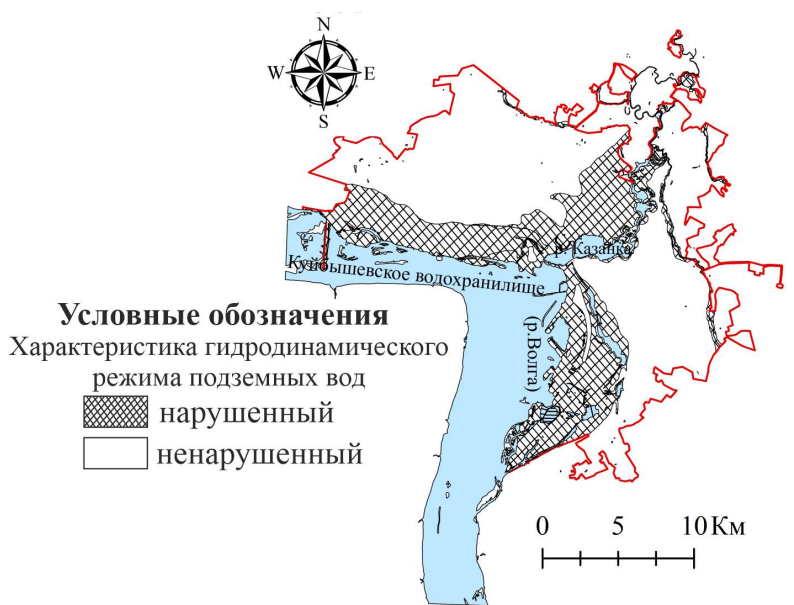
Характеристика состояния загрязненности почв	СПЗ	Индекс
загрязнение отсутствует, либо очень низкое	<1,5	1
низкая степень загрязнения	1,5-2	2
средняя степень загрязнения	2,1-4	3
высокая степень загрязнения	4,1-8	4

**Гидродинамическая обстановка.** Гидродинамическая обстановка подземного пространства города Казани очень сложная, поскольку формируется она при комплексном влиянии природных и техногенных факторов. Одним из техногенных факторов, определяющих ее состояние на значительной площади города, является влияние напорного уровня Куйбышевского водохранилища (заполнено в 1955-1957 гг.), подпор от которого распространяется в прибрежной зоне на расстоянии до 5,0 и более километров от уреза (рис.6.8) [38].

В весенний период водохранилище заполняется до отметок напорного уровня около 53,0 м, в летний период уровень поддерживается на отметках

51,0–52,0 м абс. выс., в осенне-зимний - он снижается до отметок 47,0–46,0 м абс. выс.

В весенне-летний период при достижении уровня воды в водохранилище отметок 52,0–53,0 м, грунтовые воды второй надпойменной террасы, оказавшись ниже его уровня, испытывают подпор. В результате водный поток направляется от водохранилища к бортам долин. Это процесс затрудняет разгрузку встречного потока, направленного с более высоких террас, что



вызывает повышение уровня грунтовых вод (УГВ) и, как следствие, заболачивание и подтопление низменной части территории города. В осенне-зимний период, вследствие низкого уровня водохранилища (до 47–46,0 м абс. выс.), грунтовые воды изменяют уклон в сторону его уреза и разгружаются в водохранилище, что влечет за собой снижение УГВ.

Таблица 6.10. Критерии гидродинамического режима подземных вод

Характеристика гидродинамического режима подземных вод	Изменение уровня грунтовых вод, м	Индекс
ненарушенный	0-0,6	0
нарушенный	> 0,61	1

В пределах рассматриваемой территории на правобережье реки Казанка вторая надпойменная терраса простирается с северо-востока на юго-запад. Ширина террасы в зависимости от конфигурации береговой линии составляет от 0,6–0,7 (Кировский район) до 4,5 км (Ново-Савиновский район). По данным наблюдений, за последние десятилетия уровень грунтовых вод в пределах данной территории варьирует в широком диапазоне – от 0,61 до 8,18 м.

Критерии гидродинамического режима подземных вод представлены в табл. 6.10. Границы распространения глубин залегания уровня имеют сложную конфигурацию (в зависимости от перепадов рельефа).

**Итоговая комплексная модель оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани.** Данные по всем рассматриваемым факторам были объединены в единую итоговую карту, которая показывает комплексную оценку геоэкологической обстановки изучаемой территории.

Методами ГИС-технологий построенные карты преобразованы в растровый формат (100 × 100 м), что в дальнейшем позволило задать математические отношения между картографической основой природных и техногенных факторов (рис. 6.9).

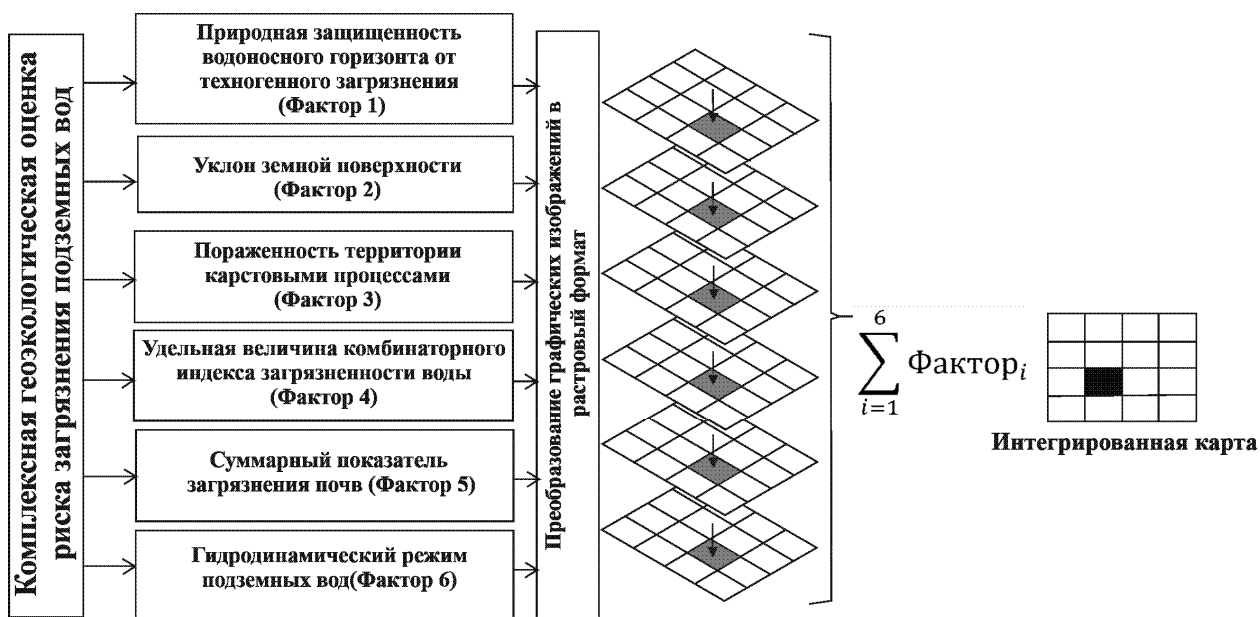


Рисунок 6.9. Принцип расчета интегрального показателя комплексной геоэкологической оценки риска загрязнения подземных вод

Таблица 6.13. Критерии риска загрязнения подземных вод

Характеристика риска загрязнения подземных вод	Интегральный показатель комплексной оценки риска загрязнения подземных вод
низкий	$\leq 7$
средний	8-11
высокий	12-15
весьма высокий	$\geq 16$

Построенная карта (рис. 6.10) иллюстрирует территориальные различия



по степени оценки риска загрязнения подземных вод на исследуемой территории города Казани. На карте показано, что более 26 % исследуемой территории приходится на воды с неблагоприятной оценкой, что подтверждается увеличением лимитируемых химических компонентов в подземных водах города Казани. В основном это воды по

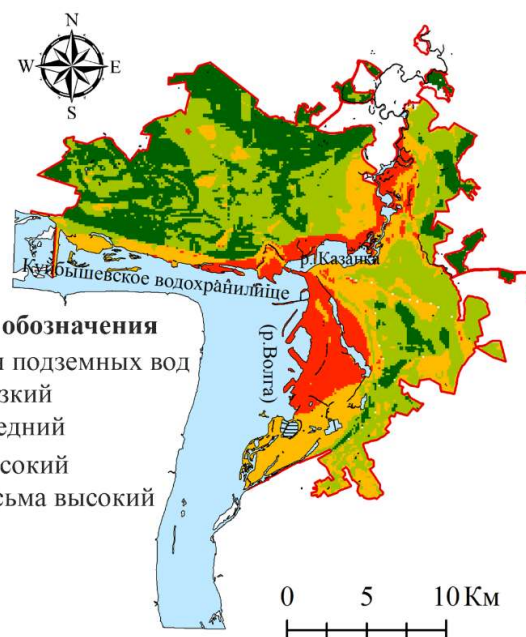


Рисунок 6.10. Интегральная модель оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани

левобережью Волги и в долине реки Казанка. Условно благоприятная оценка характерна для нижней части склонов речных долин с делювиальным шлейфом, первой и второй надпойменных террас. Благоприятная экологическая обстановка характерна для водоразделов и озерных отложений, которые занимают около 24 % городской территории. Эти участки характеризуются самыми низкими значениями лимитируемых показателей в подземных водах.

## Заключение

На основе результатов исследований, отражающих научную и практическую значимость данной работы, были сформулированы следующие выводы:

1. Осуществлена пространственная дифференциация антропогенных нагрузок (УКИЗВ, СПЗ, нарушенный гидродинамический режим подземных вод) и природных условий (уклон земной поверхности, природная защищенность водоносного горизонта от техногенного загрязнения и площадная закарстованность территории) на территории города Казани. На основе этого разработана методика оценки территории по степени риска загрязнения подземных вод с учетом влияния вышеперечисленных факторов.

2. Результаты комплексной модели оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани показали возможность принятия оперативных природоохранных решений по защите подземных вод, а также выработки приоритетных направлений городской экологической политики. Области, степень риска загрязнения подземных вод которых относится к «весьма высокой» или «высокой», должны быть защищены от антропогенной деятельности. Рекомендуется использовать эти участки в качестве природных парков и заповедников, снизив воздействие промышленных объектов, очистных сооружений и свалок.

3. Установлено, что формирование химического состава поверхностных и подземных вод на территории города Казани происходит в результате воздействия природно-техногенных систем. С учетом сложившейся обстановки, показана возможность прогнозирования значений концентрации ионов в подземных водах временного ряда с помощью ARIMA-модели.

4. Впервые проведенные комплексные исследования стабильных изотопов в природных водах подтвердили метеорное происхождение вод в пределах города Казани. Локальная линия метеорных вод, построенная на основе ежемесячных изотопных данных кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta^2\text{H}$ ), показала, что природные воды на исследуемом участке формируются в

условиях недостаточного увлажнения территории атмосферными осадками. Получен значительный объем современных сведений о составе стабильных изотопов кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) в атмосферных, поверхностных и подземных водах города Казани, эти сведения могут быть использованы для региональных исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адельшин, А.Б. Некоторые аспекты состояния систем водоснабжения и водоотведения в Республике Татарстан и пути их совершенствования / А.Б. Адельшин, А.А. Адельшин, Н.С. Урмитова // Инвестиционные подходы к естественнонаучным исследованиям и образованию: материалы Всероссийской научно–практической конференции. – Казань, 2009. – С. 182–193.
2. Александрова, А.Б. Влияние изменений некоторых физико-химических свойств почв на экологическое состояние г. Казани / А.Б. Александрова // Перспективы развития Волжского региона / Материалы всероссийской заочной конференции. – Тверь, Изд-во ТГТУ, 2001. – Вып. 3. – С. 3–4.
3. Александрова, Л.В. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем / Л.В. Александрова, В.Ю. Васильев, В.В. Дмитриев [и др.]; под ред. В.В. Дмитриева и Н.В. Хованова. – Деп. ВИНТИ № 2342В00, 2000. – 275 с.
4. Алексеев, Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте / Ю. В. Алексеев. – СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. – 216 с.
5. Алимов, А.Ф. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий / А. Ф. Алимов, В. В. Дмитриев, Т.М. Флоринская [и др.]; под ред. А.К. Фролова. – СПб., 1999. – 253 с.
6. Афанасьев, П.Р. Организация карстологического мониторинга на территории Республики Татарстан / П.Р. Афанасьев // Карстоведение XXI. теорет. и практ. Значение. – Пермь, 2004. – С. 312–316.
7. Бакуменко, Л.П. Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл) / Л.П. Бакуменко, П.А. Коротков // Прикладная эконометрика. – № 1(9). – 2008. – С. 73–92.

8. Белоусова, А.П. Основные принципы и рекомендации по оценке и картированию защищенности подземных вод от загрязнения / А.П. Белоусова // Водные ресурсы. – 2003. – Т. 30. № 6. – С. 667–677.
9. Бубырь, Д.С. Разработка моделей, алгоритмов и программ прогнозирования показателей качества питьевой воды в системе водоочистки: дис. 143 ...канд. техн. наук: 05.13.18 / Д.С. Бубырь – Ульяновск, 2017. –145 с.
10. Бурлин, М.Ю. Руководство по среднемасштабному картированию условий защищенности подземных вод от загрязнения. Отчет ЗАО Геолинк Консалтинг по теме: 3.18 / М.Ю. Бурлин, Д.В. Коннов, Е. Н. Лапшина, И.С. Пашковский. – Москва, 2002 г. – 272 с.
11. Васильчук, Ю.К. Изотопные методы в географии / Ю.К. Васильчук, Н. А. Буданцева, А.К. Васильчук [и др.]; Часть 3: Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2013. – 216 с.
12. Водорезов, А.В. Антропогенный морфогенез в пределах староосвоенных территорий центра Русской равнины и его роль в трансформации исходных ландшафтов (на примере Рязанской области). Автореф. дис. канд. геогр. наук. – Ярославль, 2005. – 27 с.
13. Водяницкий, Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами / Ю.Н. Водяницкий, Д.В. Ладонин, А. Т. Савичев. – М.: Россельхозакадемия, 2012. – 304 с.
14. Водяницкий, Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах / Ю.Н. Водяницкий. – М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. – 86 с.
15. Галимова, А.Р. Оценка вклада предприятий в формирование полиметаллического загрязнения поверхностных вод в районе г. Казани / А.Р. Галимова, Р.Р. Шагидуллин, Ю.А. Тунакова // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №14. – С. 245–248.
16. Галимова, А.Р. Оценка вклада предприятий г.Казани в загрязнение Куйбышевского водохранилища / Ю.А. Тунакова, А.Р. Галимова // Сборник

трудов конференции «XV Всероссийской конференции «Химия и инженерная экология» с международным участием». – Казань, 2015. – С. 157–161.

17. Глазовская, М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР / М.А. Глазовская. – М.: Высшая школа, 1988. – 324 с.

18. ГН 2.1.5.2280–07 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно–питьевого и культурно–бытового водопользования. Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315–03» (зарег. в Минюсте РФ 22.11.2007 г. № 10520).

19. Гольдберг, В.М. Природные и техногенные факторы защищенности грунтовых вод / В.М. Гольдберг // Бюлл. МОИП, 1983. – №2. – С. 103–110.

20. Горюнова, С.В. Закономерности процесса антропогенной деградации водных объектов: Дис. ... докт. биол. наук / С.В. Горюнова; Российский университет дружбы народов. – Москва, 2006. – 388 с.

21. Двинских, С.А. Структура природно–техногенной системы как источника воздействия на окружающую среду / С.А Двинских, В.А. Почечун, О.А. Медведев // Вопросы современной науки и практики. – Москва, 2012. – № 4(42). – С. 10–17.

22. Елкин, В.А. Подходы к оценке карстовой опасности на территории Республики Татарстан / В.А. Елкин // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М.: ГЕОС, 2002. – Вып. 4. – С. 118–123.

23. Елпатьевский, П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно–техногенных геосистемах / П.В. Елпатьевский. – М.: Наука, 1993. – 253 с.

24. Епринцев, С.А. Изучение параметров качества окружающей среды урбанизированных территорий в условиях повышенной антропогенной нагрузки / С.А. Епринцев, С.В. Шекоян // Геополитика и экогеодинамика регионов. – Симферополь, 2014. – Т. 10. – Вып. 2. – С. 520–525.

25. Епринцев, С.А. Оценка влияния городской застройки и загрязнения воздушного бассейна на здоровье населения г. Воронежа / С.А. Епринцев, С.А. Куролап, О. В. Клепиков // Вестник Тамбов. университета. Сер. Естественные и технические науки. – Тамбов, 2009. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 600–604.
26. Епринцев, С.А. Формирование зон экологического риска в промышленно–развитом городе (на примере г. Воронежа): автореф. дис. ... канд. геогр. наук.: 25.00.36 / Епринцев Сергей Александрович. – Воронеж, 2007. – 24 с.
27. Жердев, В.Н. Геоинформационный метод комплексного картирования при мониторинге земель / В.Н. Жердев, В.М. Умывакин // Современные проблемы землепользования Центрального Черноземья России: (землеустройство, кадастр и мониторинг земель). – Воронеж, 1997. – С. 58–65.
28. Жердев, В.Н. Интегральные оценки экологического риска антропогенной деятельности в проблемах мониторинга и управления земельными ресурсами в ЦЧР / В.Н. Жердев, П.С. Русинов, В.М. Умывакин // Вестник воронеж. отд. рус. географ. о–ва. – 2000. – Т. 2, вып. 1. – С. 63–65.
29. Заиканов, В.Г. Методическая основа комплексной геоэкологической оценки территории / В. Г. Заиканов, Т. Б. Минакова; Ин–т геоэкологии РАН. – Москва: Наука, 2008. – 81 с.
30. Заиканов, В.Г. Геоэкологическая безопасность урбанизированных территорий: подходы и пути реализации / В.Г. Заиканов, Т.Б. Минакова // Геоэкология. инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2019. №1. С. 17–23.
31. Захарова, Л.Н. Районирование территории Республики Татарстан по видам режима подземных вод / Л. Н. Захарова. – Казань, 2006 г. ГУП «НПО Геоцентр РТ, инв. №2–029.
32. Зекцер, И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды / И.С. Зекцер. – М.: Научный мир, 2001. – 328 с.

33. Иконников, Е.А. Природная защищенность подземных вод Пермского Прикамья от поверхностного загрязнения / Е.А. Иконников // Гидрогеология и карстоведение: Межвуз. сб. науч. тр. – Перм. ун–т. Пермь, 2002. – Вып. 14. – С. 132–137.
34. Казанцева, А.С. Мониторинг изотопного состава атмосферных осадков на территории Пермского края (предварительные результаты) / А. С. Казанцева, О. И. Кадебская., Ю.В. Дублянский [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2019 (2020). – №.3 – С. 87–94.
35. Карпенко, Н.П. Гидрогеоэкологическое обоснование размещения техногенной нагрузки с использованием синтезированных карт естественной защищенности грунтовых вод / Н.П. Карпенко, М.А. Ширяева // Природообустройство. – 2020. – № 3. – С. 114–122.
36. Кац, В.Е. Комплексный подход к оценке экологического состояния территорий (на примере Республики Алтай) / В.Е. Кац // Материалы Международной конференции: Экология и рациональное природопользование на рубеже XX века. Итоги и перспективы. – Томск, 2000. – С. 160–162.
37. Каюков, П.Н. Сводный отчет Казанской гидрогеологической и инженерно–геологической станции за 1963–1970 гг. / П.Н. Каюков, Л.Н. Захарова. – Казань, 1971 г. – 128 с.
38. Каюков, П.Н. Формирование грунтовых вод под влиянием Куйбышевского водохранилища / П. В. Каюков // Материалы I науч.–технич. совещ. по изучению Куйбышевского водохранилища. – Куйбышев, 1963. – Вып. 4. – С. 112–116.
39. Кислов, А.В. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно–Европейской равнины в условиях потепления XXI века / А.В. Кислов, В.М. Евстигнеев, С.М. Малхазова [и др.]. – Москва: Макс-Пресс, 2008. – 292 с.
40. Кондратьева, Т.А. Статистический анализ и моделирование экологических процессов в водных экосистемах на примере р. Казанка / Т.А.



Кондратьева, Ю.В. Максимов, Р.Н. Исмаилова // Вестник Казанского технического университета. – 2013. – № 21. Т.19. – С. 309–314.

41. Копылов, И.С. Геоэкологическое картографирование нефтегазоносных территорий Восточной Сибири / И.С. Копылов // Геоэкологическое картографирование. Тезисы докл. Всерос. науч.– практич. конф. Опыт и результаты картографических работ в России и сопредельных странах. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1998. – С. 140–144.

42. Копылов, И.С. Методика и критерии интегральной оценки состояния природно–геологической среды / И.С. Копылов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – Пермь, 2003. – С. 286–289.

43. Копылов, И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края [Электронный ресурс]: монография / И. С. Копылов // Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2021. – 39,5 Мб; 501 с.

44. Копылов, И.С. Принципы и критерии интегральной оценки геоэкологического состояния природных и урбанизированных территорий / И.С. Копылов // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – С. 285–285.

45. Копылов, И.С. Районирование и оценка эколого–геодинамической опасности территории Пермского края на основе ГИС и ДЗЗ / И.С. Копылов // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. трудов. – Пермь, 2010. – С. 28–38.

46. Кубышкина, Е.Н. Исследование влияния урбанизированных ландшафтов на геоэкологию города Казань / Е.Н. Кубышкина // Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан. Материалы VII республиканской научной конференции. – Казань, 2007. – С. 100–101.

47. Куролап, С.А. Оценка риска для здоровья населения при техногенном загрязнении городской среды / С.А. Куролап, Н.П. Мамчик, О.В. Клепиков. – Воронеж: ВГУ, 2006. – 220 с.

48. Куролап, С.А. Экологическая экспертиза и оценка риска здоровью / С.А. Куролап, О. В. Клепиков, С.А. Епринцев. – Воронеж: Изд-во «Научная книга». – 2012. – 108 с.
49. Латыпова, В.З. Оценка и анализ антропогенной нагрузки от сброса сточных вод в поверхностные воды Республики Татарстан / В.З. Латыпова // Журнал экологии и промышленной безопасности. – 2013. – №3. – С. 53–55.
50. Летин, А.Л. Комплексное районирование по степени деградации подземных вод юга Центрального Черноземья / А.Л. Летин // Естественные и технические науки. – 2008. – С. 148–150.
51. Логинов, В.Ф. Прогнозирование изменения окружающей природной среды Беларуси на период до 2010–2020 гг. / В.Ф. Логинов, М.И. Струк // Природные ресурсы –2005.– № 2.– С. 115–118.
52. Макаров, Д.В. Прогнозирование значений цветности питьевых и исходных вод с помощью ARIMA–модели и нейронной сети / Д.В. Макаров, Е.А. Кантор, Н.А. Красулина, А.В [и др.] // Юг России: экология, развитие. – 2019.– Т.14. –№1. – С. 159–168.
53. Максимович Г.А. Скорость развития карста // Карст Урала и Приуралья: матер. Всеуральского совещания. – Пермь, 1968. – С. 29-33.
54. Малышева, О.Н. Геология района г. Казани / О.Н. Малышева, Н.Н. Нелидов, М.Н. Соколов. Изд-во Казанского университета. – 1965. – 175 с.
55. Маслов, Н.В. Применение статистических методов при мониторинге содержания фенола в составе поверхностных вод озер экосистемы Кабан / Н.В. Маслов, Н.И. Мовчан, В.А. Трутнева // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 6. – С. 179–184.
56. Мирзоев, К.М. Глубинный карст и современные движения в земной поверхности в Татарстане / К.М. Мирзоев, В.П. Степанов, Н.С. Гатиятуллин [и др.] // Георесурсы. – 2006. – № 1 (18). – С. 16–19.
57. МР 2.1.4.0032–11 Интегральная оценка питьевой воды централизованных систем водоснабжения по показателям химической

безвредности. – М. ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора, 2011. – 37 с.

58. Мусин, Р.Х. О качестве вод, используемых в системах питьевого водоснабжения г. Казани / Р.Х. Мусин, Н.А. Курлянов, З. Г. Файзрахманова [и др.] // Георесурсы. – 2014. – № 3 (58). – С. 9–16.

59. Никитин, О.В. Геоэкологический мониторинг излучины реки Казанка как фактора химического загрязнения Куйбышевского водохранилища / О.В. Никитин, В.З. Латыпова, Р.Р. Шагидуллин [и др.] // Георесурсы. – 2011. – №2 (38). – С. 27–30.

60. Новиков Ю.В. Оценка качества воды по комплексным показателям / Ю.В. Новиков // Гигиена и санитария. – 1987. – №10. – С. 7–11.

61. Пашковский, И.С. Принципы оценки защищенности подземных вод от загрязнения / И.С. Пашковский // Современные проблемы гидрогеологии и гидромеханики. – СПб, 2002. – С. 122–131.

62. Петрова, Д.И. Гидрогеохимическая характеристика подземных вод неогеновых отложений Палео-Волги в пределах территории г. Казань / Д.И. Петрова, Р.Х. Сунгатуллин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2021. – № 1. – С. 114–123.

63. Петрова, Д.И. Природная защищенность подземных вод агломераций от техногенного загрязнения / Д.И. Петрова, Р.Х. Сунгатуллин // Геология, география и глобальная энергия. – 2021. – №80 – С. 62–67.

64. Петрова, Д.И. Природная защищенность четвертичного водоносного комплекса на территории г. Казани / Д.И. Петрова // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С.211–213.

65. Петрова, Д.И. Трансформация подземных вод г. Казань в связи с созданием куйбышевского водохранилища / Д.И. Петрова // Сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь, 2020. – С. 510–512.

66. Петрова, Д.И. Тяжелые металлы в подземных водах неогенового комплекса г. Казань / Д.И. Петрова // Материалы XXXI молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца. – Санкт-Петербург, 2020. – С.222–224.

67. Петрова, Д.И. Распределение стабильных изотопов водорода и кислорода в природных водах г. Казани / Д.И. Петрова // Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С.157–160.

68. Петрова, Д.И. Техногенная трансформация подземной гидросферы г. Казани. Водоносный нижнеказанский комплекс / Д.И. Петрова // Известия Уральского государственного университета. – 2021. – Вып. 2 (62). – С.114–122.

69. Поляков, В.А. Результаты изотопных исследований гидрогеологических и гидрологических объектов / В.А. Поляков, Э.А. Батова, А.Ф. Бобков [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 9. – С. 61–64.

70. Примак, Е.А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: автореф. дис. ...канд. геогр. наук: 25.00.36 / Е. А. Примак. – СПб, 2009. – 25 с.

71. Прожорина, Т.И. Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Воронежа по состоянию снежного покрова / Т.И. Прожорина, Н.И. Якунина // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 1(27). – С. 111–114.

72. РД 52.24.643–2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. – СПб.: Гидрометеиздат, – 2002.– 55 с.

73. Рязанов, С.С. Содержание и подвижность кадмия, кобальта и цинка в гумусовых горизонтах почв Республики Татарстан / С.С. Рязанов, Д.В. Иванов, В.И. Кулагина [и др.] // Вестн. Том. гос. Ун-та. Биология. – 2017. – № 4 (40). – С. 6–24.

74. Салихова, Ф.В. Изменение природной среды г. Казани (физико–географические особенности и некоторые проблемы её оптимизации): автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Ф. В. Салихова. – М., 1980. – 16 с.

75. СанПин 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Санитарно–эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Минздрав России, 2002. – 104 с.

76. СанПиН 2.1.4.1110–02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. Минздрава России, 2000. – 16 с.

77. СанПин 2.1.5.980–00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. – М.: Федеральный центр Россанэпиднадзора Минздрава России, 2000. – 18 с.

78. Соботович, Э.В. Изотопно–геохимические методы оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод / Э.В. Соботович, Г.Н. Бондаренко, В.Е. Ветштейн [и др.] – Киев: Наукова думка, 1977. – 154 с.

79. Соколовский, Л.Г. Изотопно–гидрогеохимическое изучение подземных и поверхностных вод Западно–Сибирского артезианского бассейна и Уральской сложной гидрогеологической складчатой области / Л.Г. Соколовский, В.А. Поляков // Разведка и охрана недр. – Москва, 2010. – С. 65–71.

80. Станкевич Е.Ф. Полевые карстовые провалы в центральной части г. Казани / Е.Ф. Станкевич, Р.С. Субботин // Известия ВГО. – 1979. – Т. 3, выпуск 4. – С. 351–354.

81. Стратиграфический кодекс России. Издание третье. – СПб: Изд. ВСЕГЕИ, 2006.

82. Сунгатуллин, Р.Х. Влияние техногенеза на формирование современных кор выветривания и водоносных ареалов / Р.Х. Сунгатуллин //

Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2010. – № 6. – С. 494–502.

83. Сунгатуллин, Р.Х. Интегральная геология – новое научное направление / Р.Х. Сунгатуллин // Развитие идей Н.А. Головкинского и А.А. Штукенберга в Казанской геологической школе. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – С. 152–155.

84. Сунгатуллин, Р.Х. Интегральная геоэкологическая модель Республики Татарстан / Р.Х. Сунгатуллин, М.И. Хазиев // Геодезия и картография. – 2009. – № 4. – С. 43–50.

85. Сунгатуллин, Р.Х. Системный подход при изучении гидросферы на промышленно-урбанизированных территориях / Р.Х. Сунгатуллин, М.И. Хазиев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2009. № 1. – С. 19–31.

86. Сунгатуллин, Р.Х. Интегральная геология / Р.Х. Сунгатуллин – Казань: Изд-во ООО «Образцовая типография» – 2006. – 142 с.

87. Сунгатуллин, Р.Х. Комплексный анализ геологической среды (на примере Нижнекамской площади) / Р.Х. Сунгатуллин – Казань: Мастер-Лайн, 2001. – 140 с.

88. Сунгатуллин, Р.Х. Моделирование состояния геологической среды при интенсивном антропогенезе / Р.Х. Сунгатуллин // Геоэкология. – 2005. – № 5. – С. 390–394.

89. Таргульян, В.О. Память почв и геосистем: взаимодействия в системе «геосфера–биосфера–человек» / В.О. Таргульян, М.А. Бронникова, Р.Г. Грачева [и др.] // Век географии. – Москва, 2018.– С. 184 –206.

90. Федоров, Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы / Ю.А. Федоров. – Изд-во: Истина, 1999 г. – 366 с.

91. Ферронский, В.И. Изотопия природных вод / В.И. Ферронский. – Москва, 1978. – 245 с.

92. Хомич, В.С. Городская среда: геоэкологические аспекты / В.С. Хомич, С.В. Какарека, Т.И. Кухарчик [и др.] – Минск: Белорусская наука, 2013. – 301 с.
93. Шагидуллин, А.Р. Оценка уровня загрязнения воздушного бассейна г. Казани выбросами стационарных и передвижных источников загрязнения (сообщение 1) / А.Р. Шагидуллин, Ю.А. Тунакова, Р.Р. Шагидуллин [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. Т.18, №8 – С. 231–233.
94. Шварцев, С.Л. Общая гидрогеология / С.Л. Шварцев // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Альянс, 2012. – 601 с.
95. Шестаков, А.С. Эколого–географические ситуации интегральное отражение состояния окружающей среды / А.С. Шестаков // Оценка качества окружающей среды и экологическое картографирование. – М.: ИГ РАН. – 1995. – С. 39–52.
96. Шестопапов, В.М. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции / В.М. Шестопапов, А.С. Богуславский, В. Н. Бублясь. – Киев, 2007. – 120 с.
97. Aller, L. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings / L. Aller, T. Bennet, J. Leher, [et al.] // U.S. Environmental Protection Agency: Chicago, IL, USA, 1987 p.
98. Alsudani, R. The use of some of the information criterion in determining the best model for forecasting of thalassemia cases depending on Iraqi patient data using ARIMA model / R. Alsudani, J. Liu // J. Appl. Math. Phys. Vol. 5. – 2017. P. 667–679.
99. Appelo, C. Geochemistry, Groundwater and pollution / C. Appelo, D. Postma // Netherlands: A.A. Balkema Publishers. – Leiden. – 2005. – 649 p.
100. Barbieri, M. The importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination / M. Barbieri // J. Geol. Geophys. – 2016. – Vol. 5:237. P. 1–4.

101. Cabral, M. Heavy metals of Santiago Island (Cape Verde) top soils: Estimated Background Value maps and environmental risk assessment / M. Cabral, E. Ferreira, M. Silva, [et al.] // *Journal of African Earth Sciences*, 2015. – №. 101. – P. 162–176.
102. Cai, L. Source identification of eight hazardous metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China / L. Cai, Z. Xu, M. Ren [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012. – Vol. 78. – P. 2–8.
103. Chai, Y. Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng–Songyuan area, Jilin Province, Northeast China / Y. Chai, J. Guo, S. Chai, J. [et al.] // *Chemosphere*, 2015. – №. 134. – P. 67–74.
104. Chenini, I. Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling / I. Chenini, S. Khemiri // *Int J Environ Sci Tech*. Vol 6(3). – 2009. – P. 509–519.
105. Craig, H. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines / H. Craig. – *Science*. – 1966. – Vol. 154. – P. 1544–1548.
106. Craig, H. Isotopic variations in meteoric waters / H. Craig. // *Science*. – 1961. – №133 (3465). – P. 1702–1703.
107. Craig, H. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures / H. Craig, L. Gordon. – Pisa. – 1965. – 131 p.
108. Daliakopoulos, I. Groundwater level forecasting using artificial neural network / I. Daliakopoulos, P. Coulibalya, I. Tsani // *Journal of Hydrology*. Vol. 309 (1–4). – 2005. – P. 229–240.
109. Doabi, S. Multivariate statistical analysis of heavy metals contamination in atmospheric dust of Kermanshah province, western Iran, during the spring and summer 2013 / S. Doabi, M. Afyuni, M. Karami // *Journal of Geochemical Exploration*, 2017. – Vol. 180. – P. 61–70.
110. Dreybrodt W. Equilibrium chemistry of karst waters in limestone terranes. In: Klimchouk A, Ford DC, Palmer AN, Dreybrodt W (eds) *Speleogenesis*,



evolution of karst aquifers. National Speleological Society Inc, Huntsville, 2000. – P. 126–135.

111. Faruk, D. A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series prediction / D. Faruk // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 23 (4). – 2010. – P. 586–594.

112. Foster, D. “Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy.” In *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants* / D. Foster // *Proceedings and Information No. 838 of the International Conference Held in the Netherlands*, edited by W. van Duijvenbooden and H. G. Van Waegeningh. – 1987. – P. 69–86.

113. Galavi, H. River-level forecasting using ARIMA and ANFIS models / H. Galavi, M. Mirzaei, L. Shui [et al.] // *Am Water Works Assoc*. Vol. 105 (9). – 2013. – P. 496–506.

114. Granskog, M. Development, structure and composition of land-fast sea ice in the northern Baltic Sea / M. Granskog, T. Martma, R. Vaikmäe // *Journal of Glaciology*. – 2003. Vol.49. № 164. –P.139–148.

115. Hipel, K. *Time Series Modeling of Water Resources and Environmental Systems* / K. Hipel, A. McLeod. – *Development in Water Sciences*, Elsevier, Amsterdam. Vol. 45. – 1994. – 1013 p.

116. Hodgson, F. The use of multiple linear regression in simulating groundwater level responses / F. Hodgson // *Groundwater*. Vol. 16 (4). –1978. – P. 249–253.

117. Hoque, M. Tracing recharge to aquifers beneath an Asian megacity with Cl/Br and stable isotopes: the example of Dhaka / M. Hoque, J. McArthur, P. Sikdar [et al.] // *Bangladesh. Hydrogeol. J*. Vol. 22 (7). –2014. 1549e1560.

118. Katimon, A. Modeling water quality and hydrological variables using ARIMA: a case study of Johor River, Malaysia / A. Katimon, S. Shahid, M. Mohsenipour // *Sustainable Water Resour. Manag.* – 2017. – P. 991–998.

119. Kendall, C. Fundamentals of Isotope Geochemistry, in Isotope Tracers in 817 Catchment Hydrology / C. Kendall, J. J. McDonnell // Elsevier, 818 Amsterdam, Netherlands. – 1998. – P. 51–86.
120. Lapworth, D. Deep urban groundwater vulnerability in India revealed through the use of emerging organic contaminants and residence time tracers / D. Lapworth, P. Das, A. Shaw [et al.] // Environ. Vol. 240. – 2018. – P. 938–949.
121. Lienard, A. Soil contamination near a former Zn–Pb ore–treatment plant: Evaluation of deterministic factors and spatial structures at the landscape scale / A. Lienard, Y. Brostaux, G. Coolinet // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – №. 147. – P. 107–116.
122. Likulu A. Assessment of Heavy Metal Enrichment and Degree of Contamination Around the Copper–Nickel Mine in the Selebi Phikwe Region, Eastern Botswana / A. Likulu, K. Mmolawa, G. Gaboutloeloe // Environment and Ecology Research, 2013. – V. 1(2). – P. 32–40.
123. Lu A. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shinyi, Beijing, China / A. Lu, J. Wang, X. Qin [et al.] // Science of the Total Environment, 2012. – №. 425. – P. 66–74.
124. MacDonald, A. Groundwater quality and depletion in the IndoGangetic Basin mapped from in situ observations / A. MacDonald, H. Bonsor, K. Ahmed [et al.] // Nat. Geosci. Vol. 9 (10). – 2016. – P. 762–766.
125. Margat J. Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution / J. Margat. – BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orleans. – 1968. – 123 p.
126. Maskey, S. Groundwater model approximation with artificial neural network for selecting optimal pumping strategy for plume removal / S. Maskey, Y. Dibike, A. Jonoski [et al.] / In: Workshop Proceedings in Artificial Intelligence Methods in Civil Engineering Applications. – 2000. – P. 67–80.
127. Nayak, P. Short–term flood forecasting with a neuro-fuzzy model / P. Nayak, K. Sudheer, D. Rangan [et al.] // Water Resour. Res. 41 (4). Art. NO. W04004. Eng. Appl. Artif. Intell. 23 (4). – 2005. – P. 586–594.

128. Peng, H. Krouse The influence of below- cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation / H. Peng, S. Mayer, S [et al.] // Canada. *Tellus B*, 59. – 2007. – P. 698–704.
129. Poh, S–C. The common pitfall of using Enrichment Factor in assessing soil heavy metal pollution / S–C. Poh, N. Tahir // *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. – 2017. – Vol. 21. – №. 1. – P. 52–59.
130. Queen, C. Forecast covariances in the linear multiregression dynamic model / C. Queen, B. Wright, C. Albers // *Journal of Forecasting*. – 2008. Vol. 27. – P. 175–191.
131. Rossello M., Royo C., Sanchez–Garcia M., Soriano J. M. Genetic dissection of the seminal root system architecture in mediterranean durum wheat landraces by genome–wide association study / M. Rossello, C. Royo, M. Sanchez–Garcia M [et al.] // *Agronomy*. – 2019. Vol. 9 (7). – P. 1–17.
132. Semyachkov, A. Systematic approach and its use during the environmental situation study experiencing technogenic impact / A. Semyachkov, V. Pochechun, A. Terekhanov // *Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences* № 6–2. India. – 2015. – P. 117–124.
133. Shakirzyanov A. Assessment of the ecological state of Kazan surface waters / A. Shakirzyanov, D. Petrova // *GEORESUSY*. – 2021. – Vol.23, Is.4. – P.124–128.
134. Shouakar–Stash, O. Geochemistry, and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes of the deep groundwaters, of the Siberian platform, Russia / O. Shouakar–Stash, S. Alexeev, S. Frape [et al.] // *Applied Geochemistry*. – 2007. Vol. 22. Issue 3. – P. 589–605.
135. Sims, C.A. Macroeconomics and reality / C.A. Sims // *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. – 1980.– Vol. 48. – No 10. – P.1–48.
136. Tachikawa, T. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 / T. Tachikawa, M. Kaku, A. Iwasaki [et al.] // *Summary of Validation Results*. – 2011 a. – 27 p.

137. Thyer, M. Modeling long-term persistence in hydroclimatic time series using a hidden state Markov model / M. Thyer, G. Kuczera // *Water Resour. Res.* – 2000. Vol. 36. – P. 3301–3310.
138. Valipour, M. Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir / M. Valipour, M. Banihabib, S. Behbahani // *J. Hydrol.* – 2013. Vol. 476. – P. 433–441.
139. Vallejo, N. Creación de un metaverso en opensim para la universidad distrital dentro de la red rita-ud / N. Vallejo, E. Sierra, R Escobar // *Redes Ing.* – 2012. Vol. 3. – P. 51–60.
140. Wang, M. Development of Long-term Spatiotemporal Models for Ambient Ozone in Six Metropolitan regions of the United States: The MESA Air Study / M. Wang, J. Keller, S. Adar [et al.] // *The MESA Air Study. Atmos. Environ.* – 2015. Vol. 123. – P. 79–87.
141. Wang, W. Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition / W. Wang, K. Chau, D. Xu [et al.] // *Water Resour. Manag.* – 2015. Vol. 29. – P. 2655–2675.
142. Wei, W. *Time Series Analysis*. Addison–Wesley Publishing Company / W. Wei. – Inc., New York. – 1990. – 634 p.
143. Xu, J. An advanced spatio-temporal model for particulate matter and gaseous pollutants in Beijing, China / J. Xu, W. Yang, B. Han [et al.] // *Atmos. Environ.* – 2019. Vol. 211. – P 120–127.
144. Zhan, Y. Spatiotemporal prediction of daily ambient ozone levels across China using random forest for human exposure assessment / Y. Zhan, Y. Luo, X. Deng [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2018. Vol. 233. – P. 464–473.
145. Zhang, J. Consensus genetic linkage map construction and QTL mapping for plant height-related traits in linseed flax (*Linum usitatissimum* L.) / J. Zhang, Y. Long, L. Wang L [et al.] // *BMC Plant Biol.* – 2018. – P. 1–12.

146. Zhang, G. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network models / G. Zhang // Neurocomputing. – 2003. – Vol. 50 (1). – P. 159–175.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Характеристика химического состава подземных вод четвертичный (Q) – отложений

Показатель, единица измерения	ПДК	N набл.	Среднее	Минимум	Максимум	% выше ПДК (выше ПДК)
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1000	52	643,6	133,8	1530,2	49,9
pH, ед. pH	6–9	52	7,49	7	7,8	–
Общая жесткость, °Ж	7	52	6,86	2,2	12,9	10,2
Перманганатная окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	5	52	0,83	0,25	3,72	–
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	52	0,0009	0,0005	0,01	–
ПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	52	0,0046	0,0025	0,062	–
Фенольный индекс	0,25	52	0,00017	0,00005	0,3	6,1
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	–	52	264,7	42,3	593,1	–
Хлориды (Cl), мг/дм <sup>3</sup>	350	52	37,3	12,5	347,1	–
Сульфаты (SO <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	500	52	96,6	21,33	1094	50
Кальций (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	–	52	35,2	16,8	112,3	–
Магний (Mg), мг/дм <sup>3</sup>	50	52	15,8	0,3	43,1	–
Натрий (Na)+ Калий (K), мг/дм <sup>3</sup>	200	7	6,74	0,23	112,2	–
Аммоний (NH <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	2	52	0,30	0,001	12	38
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	45	52	1,25	0,003	54,2	6,1
Алюминий (Al), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	52	0,043	0,02	0,049	–
Барий (Ba), мг/дм <sup>3</sup>	0,7	52	0,009	0,0001	0,067	–
Бериллий (Be), мг/дм <sup>3</sup>	0,0002	52	0,00002	0,00001	0,00005	–
Бор (B), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	52	0,014	0,003	0,061	–
Железо общее (Fe), мг/дм <sup>3</sup>	0,3	52	0,22	0,01	0,4	25,1
Кадмий (Cd), мг/дм <sup>3</sup>	0,001	52	0,00001	0,00001	0,0001	–
Кремний (Si), мг/дм <sup>3</sup>	10	52	8,9	8,38	9,6	–
Марганец (Mn), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	52	0,096	0,001	0,22	21,5
Медь (Cu), мг/дм <sup>3</sup>	1	52	0,0005	0,0001	0,001	–
Молибден (Mo), мг/дм <sup>3</sup>	0,25	52	0,00031	0,00003	0,003	–
Мышьяк (As), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	52	0,00034	0,0002	0,008	–
Никель (Ni), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	52	0,0081	0,0002	0,07	–
Ртуть (Hg), мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	52	0,00007	0,000005	0,001	–
Свинец (Pb), мг/дм <sup>3</sup>	0,03	52	0,0008	0,0003	0,001	–
Селен (Se), мг/дм <sup>3</sup>	0,01	52	0,0022	0,002	0,0032	–
Стронций (Sr), мг/дм <sup>3</sup>	7	52	0,7	0,005	1,55	–
Фториды (F), мг/дм <sup>3</sup>	1,5	52	0,32	0,25	0,38	–
Хром (Cr), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	52	0,0023	0,001	0,003	–
Цинк (Zn), мг/дм <sup>3</sup>	5	52	0,017	0,001	0,034	–
Общая α–радиоактивность, Бк/л	0,1	52	0,033	0,03	0,06	–
Общая β–радиоактивность, Бк/л	1	52	0,0074	0,005	0,01	–

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Характеристика химического состава подземных вод неогеновых (N) – отложений

Показатель, единица измерения	ПДК	N набл.	Среднее	Минимум	Максимум	% выше ПДК (выше 0,5 ПДК)
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1000	182	436,1	107,3	783,4	–
pH, ед. pH	6–9	182	7.27	7	7,8	–
Общая жесткость, °Ж	7	182	8.41	2,2	12,9	19,2
Перманганатная окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	5	182	1.44	0,25	3,2	–
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	182	0,008	0,0005	0,01	–
ПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	182	0,0052	0,0025	0,073	–
Фенольный индекс	0,25	182	0,00017	0,00005	0,0066	–
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	–	132	312.41	202,0	457,3	–
Хлориды (Cl), мг/дм <sup>3</sup>	350	114	24.15	4,12	347,6	–
Сульфаты (SO <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	500	132	145.14	8,0	560,0	14,4
Кальций (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	–	182	23	62,6	99,1	–
Магний (Mg), мг/дм <sup>3</sup>	50	114	0,33	23,1	66	–
Натрий (Na)+ Калий (K), мг/дм <sup>3</sup>	200	54	24.48	0,23	137,9	–
Аммоний (NH <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	2	114	0.91	0,001	1,2	–
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	45	114	8,42	0,6	41,34	–
Алюминий (Al), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	182	0,043	0,02	0,04	–
Барий (Ba), мг/дм <sup>3</sup>	0,7	182	0,009	0,0001	0,35	–
Бериллий (Be), мг/дм <sup>3</sup>	0,0002	182	0,00002	0,00001	0,00005	–
Бор (B), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	182	0,010	0,001	0,4	–
Железо общее (Fe), мг/дм <sup>3</sup>	0,3	182	0.29	0,01	0,4	25,1
Кадмий (Cd), мг/дм <sup>3</sup>	0,001	182	0,00001	0,00001	0,0001	–
Кремний (Si), мг/дм <sup>3</sup>	10	182	8,9	8,38	9,6	–
Марганец (Mn), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	182	0,2	0,001	0,65	13,7
Медь (Cu), мг/дм <sup>3</sup>	1	182	0,0005	0,0001	0,001	–
Молибден (Mo), мг/дм <sup>3</sup>	0,25	182	0,00031	0,00003	0,003	–
Мышьяк (As), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	182	0,00034	0,0002	0,008	–
Никель (Ni), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	182	0,0081	0,0002	0,07	–
Ртуть (Hg), мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	182	0,000079	0,000005	0,001	–
Свинец (Pb), мг/дм <sup>3</sup>	0,03	182	0,0008	0,0003	0,001	–
Селен (Se), мг/дм <sup>3</sup>	0,01	182	0,0012	0,0001	0,022	–
Стронций (Sr), мг/дм <sup>3</sup>	7	182	0,9	0,005	0,32	–
Фториды (F), мг/дм <sup>3</sup>	1,5	182	0,32	0,25	0,38	–
Хром (Cr), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	182	0,0023	0,001	0,003	–
Цинк (Zn), мг/дм <sup>3</sup>	5	182	0,017	0,001	0,034	–
Общая α–радиоактивность, Бк/л	0,1	101	0,033	0,03	0,06	–
Общая β–радиоактивность, Бк/л	1	101	0,0074	0,005	0,01	–

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Характеристика химического состава подземных вод вехнеказанский (P2kz2)  
– отложений

Показатель, единица измерения	ПДК	N набл.	Среднее	Минимум	Максимум	% выше ПДК (выше 0,5 ПДК)
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1000	72	855,75	260,0	1347,0	43
pH, ед. pH	6–9	72	7.43	7	7,9	–
Общая жесткость, °Ж	7	72	16,7	6,2	77	73,1
Перманганатная окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	5	72	1.44	0,25	7,2	1,8
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	72	0,008	0,0005	0,13	2,0
ПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	72	0,0052	0,0025	0,073	–
Фенольный индекс	0,25	72	0,0017	0,00005	0,38	4,8
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	–	54	311,6	203	498,0	–
Хлориды (Сl), мг/дм <sup>3</sup>	350	32	24.15	4,12	48,7	–
Сульфаты (SO <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	500	54	346,2	14,7	825,1	44,4
Кальций (Са), мг/дм <sup>3</sup>	–	72	117.12	5	248,0	–
Магний (Mg), мг/дм <sup>3</sup>	50	32	29,5	2,6	69,2	13,0
Натрий (Na)+ Калий (K), мг/дм <sup>3</sup>	200	24	55,8	39,1	112,5	–
Аммоний (NH <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	2	32	0,2	0,16	0,22	–
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	45	32	8,49	0,09	34,8	–
Алюминий (Al), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	72	0,08	0,0014	0,125	–
Барий (Ba), мг/дм <sup>3</sup>	0,7	72	0,069	0,023	0,19	–
Бериллий (Be), мг/дм <sup>3</sup>	0,0002	72	0,00002	0,00001	0,00005	–
Бор (B), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	72	0,2	0,095	0,35	–
Железо общее (Fe), мг/дм <sup>3</sup>	0,3	72	0,3	0,1	0,56	50,1
Кадмий (Cd), мг/дм <sup>3</sup>	0,001	72	0,00004	0,00001	0,0008	–
Кремний (Si), мг/дм <sup>3</sup>	10	72	8,9	8,38	9,6	–
Марганец (Mn), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	72	0,103	0,001	0,38	47,7
Медь (Cu), мг/дм <sup>3</sup>	1	72	0,004	0,0001	0,001	–
Молибден (Mo), мг/дм <sup>3</sup>	0,25	72	0,00031	0,0001	0,227	–
Мышьяк (As), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	72	0,00034	0,0002	0,008	–
Никель (Ni), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	72	0,0081	0,0002	0,07	–
Ртуть (Hg), мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	72	0,00007 9	0,000005	0,001	–
Свинец (Pb), мг/дм <sup>3</sup>	0,03	72	0,0008	0,0003	0,001	–
Селен (Se), мг/дм <sup>3</sup>	0,01	72	0,00057	0,0001	0,003	–
Стронций (Sr), мг/дм <sup>3</sup>	7	72	0,09	0,005	0,51	–
Фториды (F), мг/дм <sup>3</sup>	1,5	72	0,32	0,25	0,38	–
Хром (Cr), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	72	0,0023	0,001	0,003	–
Цинк (Zn), мг/дм <sup>3</sup>	5	72	0,017	0,001	0,034	–
Общая α–радиоактивность, Бк/л	0,1	29	0,033	0,03	0,06	–
Общая β–радиоактивность, Бк/л	1	29	0,0074	0,005	0,01	–



## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Характеристика химического состава подземных вод нижеказанских (P2kz1)  
– отложений

Показатель, единица измерения	ПДК	N набл.	Среднее	Минимум	Максимум	% выше ПДК (выше 0,5 ПДК)
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1000	104	923,5	425,0	1579,3	80
pH, ед. pH	6–9	104	7.43	7	7,9	–
Общая жесткость, °Ж	7	104	10,3	2,2	18,07	73,1
Перманганатная окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	5	104	2,02	0,15	9,0	22,8
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	104	0,0009	0,0005	0,008	–
ПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	104	0,0052	0,0025	0,073	–
Фенольный индекс	0,25	104	0,0016	0,00068	0,0037	22,8
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	–	104	333,0	40,3	596,0	–
Хлориды (Cl), мг/дм <sup>3</sup>	350	104	13,4	1,3	42,1	–
Сульфаты (SO <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	500	104	258,3	61,2	721,8	23,3
Кальций (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	–	104	227,4	45,7	425,0	–
Магний (Mg), мг/дм <sup>3</sup>	50	104	34,2	11,1	69,1	13,8
Натрий (Na)+ Калий (K), мг/дм <sup>3</sup>	200	104	15,5	0,2	18,6	–
Аммоний (NH <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	2	104	0,44	0,05	2,9	9,8
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	45	104	10,38	0,1	48,3	9,8
Алюминий (Al), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	104	0,099	0,02	0,51	2
Барий (Ba), мг/дм <sup>3</sup>	0,7	104	0,131	0,007	0,6	2
Бериллий (Be), мг/дм <sup>3</sup>	0,0002	104	0,00009	0,00001	0,01	9,8
Бор (B), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	104	0,09	0,038	0,18	48
Железо общее (Fe), мг/дм <sup>3</sup>	0,3	104	0,3	0,0006	6,6	25,1
Кадмий (Cd), мг/дм <sup>3</sup>	0,001	104	0,00001	0,00001	0,0001	–
Кремний (Si), мг/дм <sup>3</sup>	10	104	8,9	8,38	9,6	–
Марганец (Mn), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	104	0,2	0,006	0,61	13,8
Медь (Cu), мг/дм <sup>3</sup>	1	104	0,0005	0,0001	0,001	–
Молибден (Mo), мг/дм <sup>3</sup>	0,25	104	0,00031	0,00003	0,003	–
Мышьяк (As), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	104	0,00034	0,0002	0,008	–
Никель (Ni), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	104	0,0081	0,0002	0,07	–
Ртуть (Hg), мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	104	0,000079	0,000005	0,001	–
Свинец (Pb), мг/дм <sup>3</sup>	0,03	104	0,0008	0,0003	0,001	–
Селен (Se), мг/дм <sup>3</sup>	0,01	104	0,0009	0,0001	0,009	–
Стронций (Sr), мг/дм <sup>3</sup>	7	104	0,9	0,005	7,32	4,3
Фториды (F), мг/дм <sup>3</sup>	1,5	104	0,32	0,25	0,38	–
Хром (Cr), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	104	0,0023	0,001	0,003	–
Цинк (Zn), мг/дм <sup>3</sup>	5	104	0,017	0,001	0,034	–
Общая α-радиоактивность, Бк/л	0,1	32	0,033	0,03	0,06	–
Общая β-радиоактивность, Бк/л	1	32	0,0074	0,005	0,01	–

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Характеристика химического состава подземных вод сакмарских (P<sub>1S</sub>) – отложений

	ПДК	N набл.	Среднее	Минимум	Максимум	% выше ПДК (выше 0,5 ПДК)
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1000	51	787,4	212,7	1279,3	78,4
pH, ед. pH	6–9	51	7.43	7	7,9	–
Общая жесткость, °Ж	7	51	11,8	4,2	32,67	69,8
Перманганатная окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	5	51	1,26	0,45	2,5	–
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	51	0,001	0,0005	0,009	–
ПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	51	0,0052	0,0025	0,073	–
Фенольный индекс	0,25	51	0,00017	0,00005	0,0066	–
Гидрокарбонаты (НСО <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	–	39	360,0	62,1	464,6	–
Хлориды (Cl), мг/дм <sup>3</sup>	350	32	7,1	4,6	7,5	–
Сульфаты (SO <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	500	54	222,1	53,1	647,1	19,4
Кальций (Ca), мг/дм <sup>3</sup>	–	51	140,6	68,0	316,6	–
Магний (Mg), мг/дм <sup>3</sup>	50	32	40,7	24,6	100,0	50
Натрий (Na)+ Калий (K), мг/дм <sup>3</sup>	200	24	13,0	0,35	19,35	–
Аммоний (NH <sub>4</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	2	32	1,44	0,001	3,71	23,5
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup>	45	32	4,01	0,15	9,4	–
Алюминий (Al), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	51	0,043	0,02	0,04	–
Барий (Ba), мг/дм <sup>3</sup>	0,7	51	0,009	0,0001	0,35	–
Бериллий (Be), мг/дм <sup>3</sup>	0,0002	51	0,00002	0,00001	0,00005	–
Бор (B), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	51	0,010	0,001	0,4	–
Железо общее (Fe), мг/дм <sup>3</sup>	0,3	51	0,12	0,01	0,25	–
Кадмий (Cd), мг/дм <sup>3</sup>	0,001	51	0,0009	0,00001	0,0015	19,4
Кремний (Si), мг/дм <sup>3</sup>	10	51	8,9	8,38	9,6	–
Марганец (Mn), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	51	0,128	0,02	0,301	19,4
Медь (Cu), мг/дм <sup>3</sup>	1	51	0,0005	0,0001	0,001	–
Молибден (Mo), мг/дм <sup>3</sup>	0,25	51	0,00031	0,00003	0,003	–
Мышьяк (As), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	51	0,00034	0,0002	0,008	–
Никель (Ni), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	51	0,0081	0,0002	0,07	–
Ртуть (Hg), мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	51	0,00007 9	0,000005	0,001	–
Свинец (Pb), мг/дм <sup>3</sup>	0,03	51	0,0008	0,0003	0,001	–
Селен (Se), мг/дм <sup>3</sup>	0,01	51	0,0009	0,0001	0,001	–
Стронций (Sr), мг/дм <sup>3</sup>	7	51	0,9	0,005	7,32	5,2
Фториды (F), мг/дм <sup>3</sup>	1,5	51	0,32	0,25	0,38	–
Хром (Cr), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	51	0,0023	0,001	0,003	–
Цинк (Zn), мг/дм <sup>3</sup>	5	51	0,017	0,001	0,034	–
Общая α-радиоактивность, Бк/л	0,1	19	0,033	0,03	0,06	–
Общая β-радиоактивность, Бк/л	1	19	0,0074	0,005	0,01	–