

На правах рукописи



Петрова Дарья Ивановна

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

Специальность 1.6.6. Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Казань – 2023

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель:

Королев Эдуард Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент (г. Казань)

Научный консультант:

Храмченков Максим Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор (г. Казань)

Официальные оппоненты:

Абдрахманов Рафил Фазылович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией гидрогеологии и геоэкологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа)

Павлов Сергей Харитонович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии ФГБУН Института земной коры (г. Иркутск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь)

Защита состоится «14» декабря 2023 г. на заседании диссертационного совета 24.1.062.01 при Институте земной коры СО РАН по адресу: 660433, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского научного центра СО РАН в здании Института земной коры СО РАН и на сайте: http://www.crust.irk.ru/newsfull_234.html

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные подписью и печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета к.г.-м.н. Бабичевой Виктории Аркадьевне. Тел: +79148816658, e-mail: khak@crust.irk.ru

Автореферат разослан «___» октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.г.-м.н.



В.А. Бабичева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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. Они определяют режим развития техногеосистемы. Одним из динамичных элементов геологического пространства является подземная гидросфера верхней части литосферы.

Оценка риска загрязнения подземных вод является важным элементом стратегического и социального развития города. Комплексная геоэкологическая оценка риска загрязнения подземных вод позволяет учитывать разноплановые факторы, оказывающих 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 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.

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

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

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 комплексной 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 исследуемой территории.

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 годы, 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 архивных протоколов анализов показателей качества источников водоснабжения составляет 68. Всего отобрано около 210 проб природных вод на стабильные изотопы ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$), 145 из них – атмосферные осадки.

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.

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 комплексной 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, характеризующей риск загрязнения подземных вод на территории города Казани.

Обработан значительный объем фондового материала, проведен анализ исследований, выполненных в аккредитованных лабораториях. Результаты исследований докладывались автором на конференциях, а также публиковались в рецензируемых российских изданиях.

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

Апробация результатов. 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).

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

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 благодарность научному руководителю доценту к.г.-м.н. Э. А. Королеву и научному консультанту д.ф.-м.н. М.Г. Храменкову. Автор благодарен профессору Р. Х. Сунгатуллину, доцентам М.А. Варфоломееву и Т.Р. Закирову, О.А. Софинской, инженерам О.В. Луневой и Е.Н. Яббаровой за научные консультации и обсуждение результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, приведена информация о фактическом материале, личном вкладе автора, а также о научной новизне, теоретической и практической значимостях работы.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы подземные воды и природная среда в целом рассматриваются через социально-материальную призму, где особое внимание уделяется анализу взаимодействия геологической среды и человека. В начале XXI века российскими учеными И.С.Копыловым, Р.Х. Сунгатуллиным, С.А. Куролапом, С.А. Епринцевым, В.Н. Жердевым, Т.И. Прожориной разработаны комплексные (интегральные) подходы для анализа современной обстановки природной среды, где особое внимание уделяется подземным водам в условиях высокой урбанизации городской агломерации. Яркими примерами урбанизированных территорий являются большие города, имеющие продолжительную историю воздействия на подземную гидросферу. Город Казань является крупным промышленным центром России с тысячелетней историей, что обуславливает выбор данной территории в качестве объекта исследования.

В зависимости от поставленной задачи оценки современного социо-гидрогеологического анализа природной среды используются различные критерии для создания комплексной модели на региональном уровне, с учетом главных проблем исследуемой территории. Основными факторами, влияющими на состояние подземных вод,

являются природные условия исследуемой территории и техногенное воздействие на природные среды (рис.1).

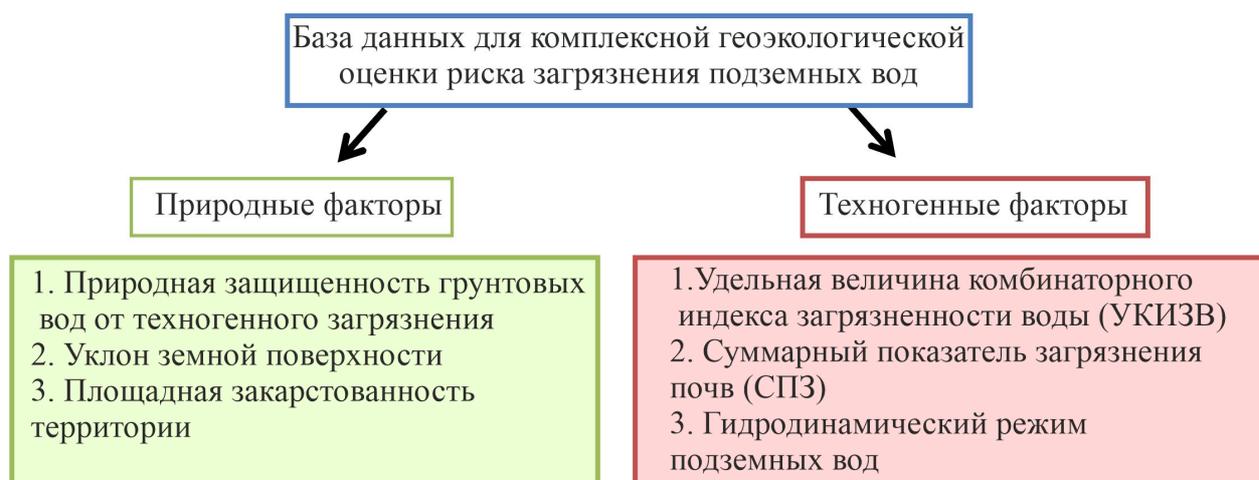


Рис. 1. Основные факторы, влияющие на состояние подземных вод

В данной работе для анализа закономерности формирования химического состава подземных вод использовались методы изотопного анализа кислорода и водорода (^{16}O , ^{18}O , ^1H и ^2H или D) и их соотношений (D/H или $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Всего за период с 15 июля 2019 года по 28 февраля 2022 г. отобрано 37 проб речных и подземных вод, 156 – атмосферных вод. Место отбора проб речных и грунтовых вод показано на рис. 2.

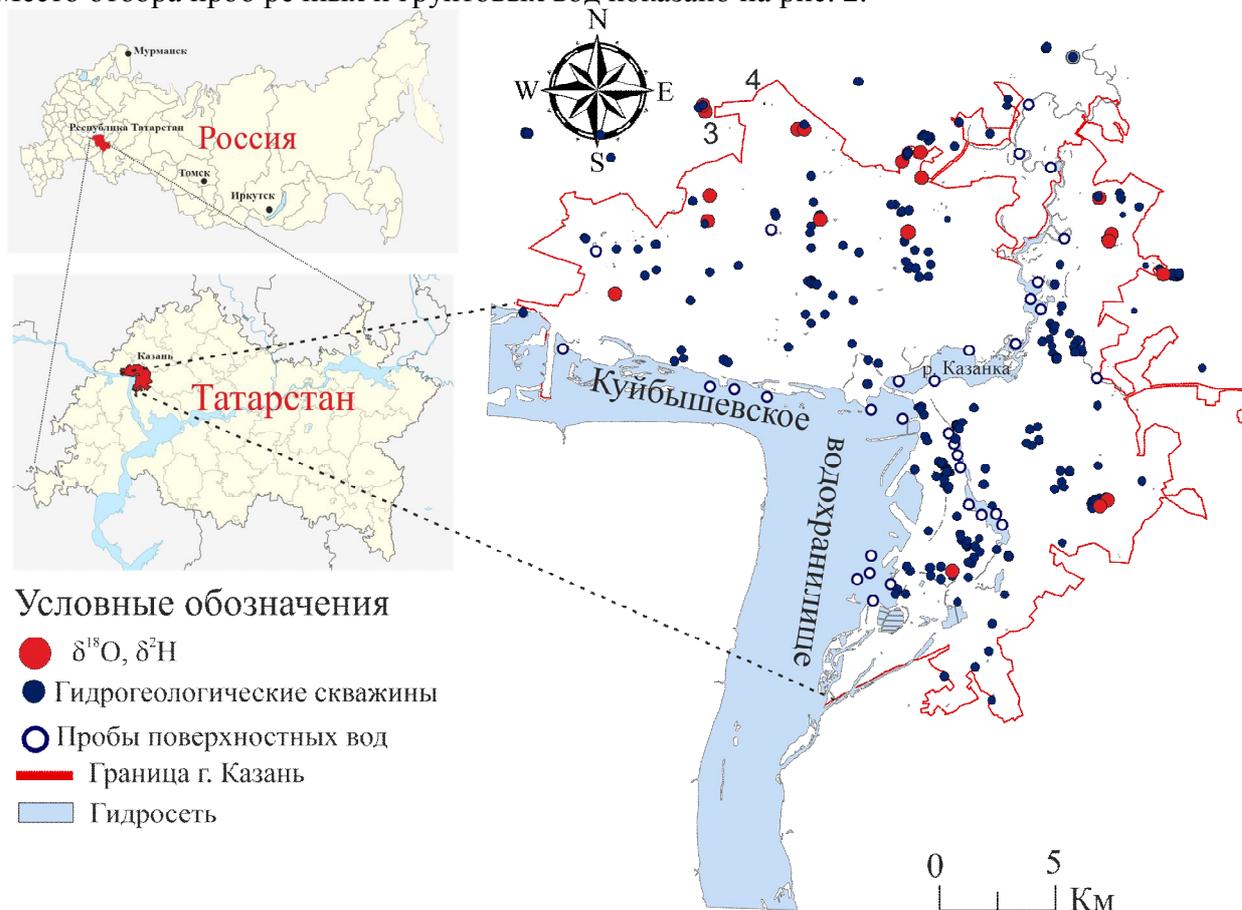


Рис. 2. Карта – схема места отбора проб: г. Казань, Республика Татарстан, Россия; точка – скважины.

Для ретроспективного анализа и прогноза геохимической обстановки к 2030 году проанализирован обширный фондовый материал из многочисленных геологических отчетов с 1961 года. Таким образом, при составлении карт число опорных водопунктов—составляло 123 скважины, в том числе: 52 эксплуатационные скважины неогенового водоносного комплекса; 71 эксплуатационная скважина нижнеказанского водоносного комплекса.

Прогноз динамики изменения значений основных геохимических показателей качества подземных вод строился на основе временных рядов с помощью интегрированной модели авторегрессии скользящего среднего— ARIMA в программе GRETЛ. Для описания анализа временных рядов в математической модели ARIMA 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;
- Θ_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.

Модель SARIMA_s—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:

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

Для выбора описанной выше модели использовалась методология Бокса—Дженкинса, которую можно свести к трем этапам: идентификация и выбор модели (стационарность, сезонность, авторегрессионные составляющие, и скользящие средние); оценка коэффициентов наилучшим образом, соответствующих выбранным параметрам, с помощью вычислительных алгоритмов; а также валидация полученной модели.

Пространственно-временное моделирование на основе прогнозных данных выполнялось с помощью современных ГИС-технологий («ArcGisMap»).

Районирование 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. Слои техногенных и природных факторов представляются в виде алгебры карт.

В дальнейшем рассчитаны математические отношения между слоями карты. Каждый фактор оценивается с помощью системы баллов. Комплексная модель оценки риска загрязнения подземных вод осуществляется по среднему баллу. В результате предлагается выделять четыре категории оценки риска загрязнения подземных вод: низкая, средняя, высокая и весьма высокая (табл. 1).

Таблица 1. Критерии оценки состояния природной среды и ее компоненты.

№	Фактор	Экологическая оценка (цифры в скобках – оценочный балл)			
1	Природная защищенность водоносного горизонта от техногенного загрязнения	Защищенные (1)	Относительно защищенные (2)	Слабо защищенные (3)	Незащищенные (4)
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	Низкая ≤ 7	Средняя (8–11)	Высокая (12–15)	Весьма высокая ≥ 16

ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Во 2 главе проведен анализ управления городскими подземными водами за 140-летний период. Исследования в области гидрогеологии и геоэкологии города Казани отображены в работах А.В. Нечаевой, П.И. Кротовой, А.А. Штукенберга, Ф.П. Саваренского, М.Я. Тумаковой, В.И. Жарковой, Д.А. Медведева, Ю.П. Бубнова, Р.Х. Мухаметшина, Е.В. Осиповой и др. Работы по анализу и обобщению 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.

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

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 км², 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/км². Город протянулся с севера на юг на 28 км, с запада на восток – на 30 км. Нижним течением реки Казанка город разделён на две части: более значительную по площади юго-восточную левобережную и северо-западную правобережную.

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.

Климат. Район исследований расположен в зоне умеренно-континентального климата с теплым летом и умеренно холодной зимой. Среднегодовые температуры атмосферного воздуха в Казани составили +4.10 °С. По среднегодовым наблюдениям в Казани выпадает 548.2 мм осадков в год. Господствующим направлением ветра является южное; средняя скорость ветра составляет 4–5 м/сек.

Изотопный состав атмосферных осадков. Большой вклад в формирование геохимического состава подземных вод принадлежит атмосферным осадкам. Учитывая это, для территории г. Казани была построена локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), отклонение которой от глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) дает важную информацию для понимания генезиса поверхностных и подземных вод. На рис. 3 отмечено, что ЛЛМВ отклоняется от ГЛМВ 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.

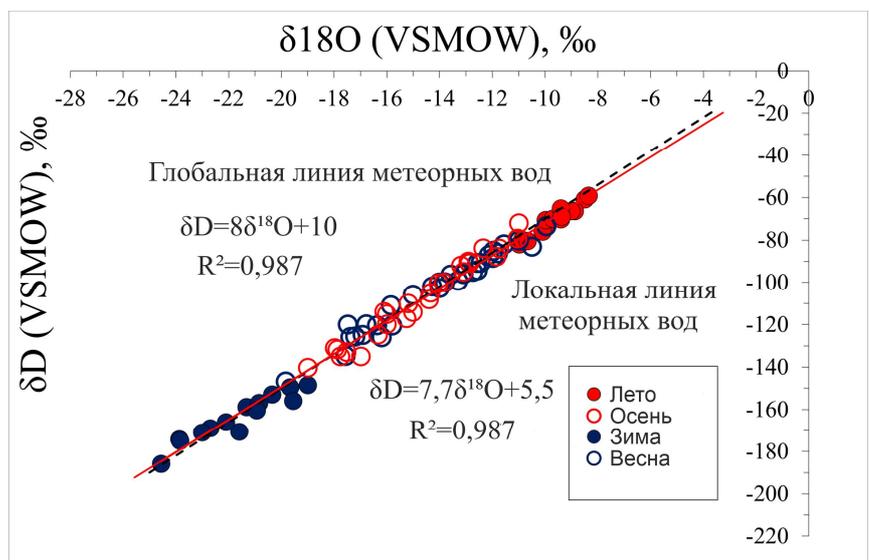


Рис. 3. Локальная линия метеорных вод для города Казани

Гидрография. Основной водной артерией территории города Казани является река Волга, которая при создании гидротехнических сооружений трансформировалась в Куйбышевское водохранилище с подпорным уровнем зеркала воды 53.0 м. Ее ближайшим крупным притоком в пределах города является река Казанка. Также в черте города протекают более мелкие реки Нокса и Сухая река, впадающие в Казанку. К правобережью Казанки приурочены многочисленные озера, большинство из которых являются центрами рекреационных зон.

Гидрогеологические условия. Территория Казани расположена в пределах Камско-Вятского артезианского бассейна и включает следующие водоносные комплексы (сверху вниз): четвертичный аллювиальный комплекс (aQ); неогеновый терригенный комплекс (aN₂); нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс (P₂kz₁); сакмарский сульфатно-карбонатный комплекс (P₁s).

Водоносный четвертичный аллювиальный комплекс (aQ). Комплекс имеет локальное

распространение, развит в пределах речных долин рек Волга и Казанка. В черте города Казани четвертичные аллювиальные образования слагают четвертую Московскую надпойменную террасу реки Волги. 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 в несколько сантиметров. Выше по разрезу залегают преимущественно суглинки с прослоями глин и тонкозернистых песков. Водоносность связана с прослоями мелко- и среднезернистых песков. Коэффициенты водопроницаемости варьируют в широких пределах от 60 до 221.0 м²/сут, что связано с изменчивостью мощности водовмещающих пород.

Водоносный неогеновый терригенный комплекс (aN₂). Водоносный неогеновый терригенный комплекс объединяет аллювиальные отложения Палео-Волги. Подошва комплекса фиксируется на абсолютных отметках от 35 м до –80 м; водовмещающими породами являются разномышленные 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 л/с, а коэффициенты фильтрации – от 1 до 60 м/сут.

Водоносный верхнеказанский карбонатно-терригенный комплекс (P₂kz₂). 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 метров. Водообильность отложений различная, удельные дебиты скважин колеблются от 0.2 до 5.0 л/с, водопроницаемость — от 130 до 800 м²/сут.

Водоносный нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс (P₂kz₁). В пределах рассматриваемой территории развит повсеместно, исключая палеодолину, где он размыт. Комплекс приурочен к нижнеказанскому подъярису казанского яруса средней перми. Основными отложениями комплекса верхней части являются известняки, реже доломиты, часто разрушенные до состояния щебня, трещиноватые песчаники и мергели. В нижней части гидрогеологического комплекса залегают пачка слабопроницаемых алевролитов с прослоями известковистых мергелей. Комплекс характеризуется высокими фильтрационными свойствами, удельные дебиты скважин 3.0–6.0 л/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, доломитами, 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 0.09–8.2 л/сек. Питание комплекса происходит в основном за пределами изучаемого района, на участках максимального гипсометрического залегания кровли сакмарских отложений, за счет перетекания из вышележащего нижнеказанского комплекса. Разгрузка высоконапорных вод зафиксирована на участках относительного погружения водовмещающих сакмарских отложений в перекрывающие их водопроницаемые нижнеказанские отложения.

ГЛАВА 4. ВОЗДЕЙСТВИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Типы природно-техногенных систем

На территории города Казани находится большое количество источников антропогенного загрязнения, которые можно разделить на несколько типов природно-техногенных систем: 1) водохозяйственный; 2) транспортный; 3) промышленный; 4) селитебный; 5) отходы производства и потребления (рис. 4).

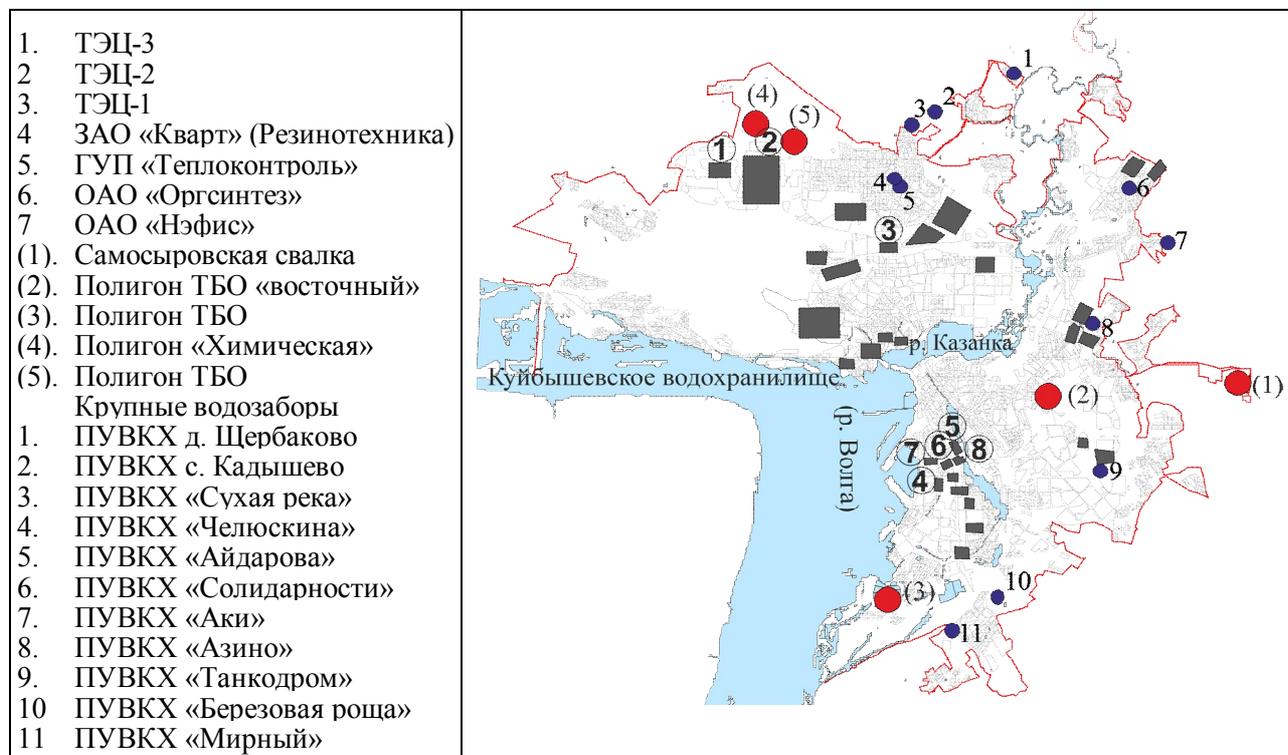


Рис. 4. Расположение источников антропогенного загрязнения на территории г. Казань

1. Водохозяйственный тип природно-техногенных систем представлен водозабортным подтипом (водозаборные скважины, колодцы и родники), объекты которого относятся к локальному источнику загрязнения. При эксплуатации водозаборных сооружений формируются депрессионные воронки, изменяются динамические параметры (напоры, уровни) подземных вод, происходит трансформация химического состава подземных вод. С увеличением водоотбора в отдельных скважинах фиксируется повышение сухого остатка, общей жесткости, возрастает содержание сульфат- и хлорид-ионов, нитратов. При длительной эксплуатации водозабора повышается содержание гидрокарбонат-иона и железа.

2. Транспортный тип представлен железнодорожным, автомобильным и подземным (метро) 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.

3. Промышленный тип делится на следующие подтипы: машиностроительный, химический и нефтехимический, строительный, энергетический. Территория города Казани входит в состав Казанско-Зеленодольского промышленного узла. Здесь на ограниченной

площади сосредоточено 3069 крупных, средних и мелких промышленных предприятий. Технологические воды предприятий, как правило, обогащены всевозможными токсичными веществами, тяжелыми металлами, механическими взвесями, минеральными маслами, аммиаком, спиртами, альдегидами, способными ухудшить качество поверхностных и подземных вод. Предприятия химической и нефтехимической промышленности (ОАО «Нэфис», ОАО «Оргсинтез») относятся к наиболее опасным с экологической точки зрения, которые 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 города Казани, включающая жилые постройки, промышленные предприятия, сеть подземных коммуникаций, дороги и др. Размещение техногенных объектов на городской территории создает механическую нагрузку на грунты, нарушая сток грунтовых вод. В результате функционирования промышленных и коммунальных предприятий города происходит загрязнение их территорий вредными веществами.

5. Отходы производства и потребления города Казани представлены твердыми и жидкими отходами свалок, отстойников и очистных сооружений, которые относятся к площадным источникам воздействия на окружающую среду. Отходы производства и потребления г. Казань способствуют повышению в почвах и грунтовых водах городской территории соединений азота, сульфатов, железа, кальция, гидрокарбонатов, тяжелых металлов и др., проникновению в них патогенных микроорганизмов. Загрязнение подземных вод отражается как в увеличении содержания основных макрокомпонентов (хлор, сульфаты, кальций, железо и др.), так и в появлении специфических, несвойственных элементов (никель, хром, селен, барий, кадмий и др.) (табл. 2).

Таблица 2. Примеры приуроченности компонентов-загрязнителей к разным видам отходов

Типы природно-техногенных систем:	Макрокомпоненты	Микрокомпоненты
Водохозяйственный	Сухой остаток, общая жесткость, HCO_3 , SO_4 , Cl , NO_3	Fe
Транспортный	NO_3 , NO_2	Fe, P, Al, Cu, Pb, Mn, Ni, Co, Zn, Cr, Li
Промышленный	HCO_3 , Na, K, Ca, Mg, SO_4 , Cl , NH_4 , NO_3 , NO_2	Fe, P, Al, Cu, Pb, Mn, Ni, Co, Zn, Cr, Li
Селитебный	NH_4 , NO_3 , NO_2	Na, K
Отходы производства и потребления	HCO_3 , Na, K, Ca, Mg, SO_4 , Cl , NH_4 , NO_3 , NO_2	Fe, Mn, Cu, B, Cd, Ni, Cr

Выделение показателей в подземных водах города Казани, содержание которых не соответствует нормативным требованиям

Результатом работ по систематизации показателей качества подземных вод на территории города Казани является перечень приоритетных показателей состава подземных вод по эксплуатируемым водозаборным скважинам. Для этого были выявлены элементы, превышающие нормативы ПДК в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01 (табл. 3).

Качество подземных вод на этих водозаборах неудовлетворительное, в основном из-за повышенной минерализации, общей жесткости и фенольного индекса. Высокие значения зафиксированы по содержанию сульфат-иона, общего железа и нитрат-иона.

Таблица 3. Перечень приоритетных показателей качества подземных вод Казани по эксплуатационным водоносным горизонтам

Водоносный комплекс	Показатели выше ПДК	Показатели 1, 2 класса опасности выше 0.5 ПДК
Q	Минерализация, общая жесткость, фенол (фенольный индекс), SO ₄ , NO ₃ , NH ₄ , Fe, Mn	Na+K
N	Общая жесткость, SO ₄ , Fe, Mn	Na+K
P ₂ kz ₂	Минерализация, общая жесткость, фенол (фенольный индекс), перманганатная окисляемость, SO ₄ , Mg, NO ₃ , NH ₄ , Fe, Be,	-
P ₂ kz ₁	Минерализация, общая жесткость, фенол (фенольный индекс), перманганатная окисляемость, SO ₄ , Mg, NO ₃ , NH ₄ , Fe, B, Sr	Ba
P ₁ s	Минерализация, общая жесткость, SO ₄ , Mg, NH ₄ , Cd, Mn, Sr	B, Ba

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ 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 является инструментом для прогнозирования антропогенного воздействия исследуемой территории и управления водными ресурсами.

К началу работ по составлению карт число опорных водопунктов составляло 123 скважины, в том числе:

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

В данном исследовании на основе временных рядов проводился прогноз основных ионов на 2030 год, значения которых варьируются в широком диапазоне под действием техногенного воздействия. Наблюдения проводятся через одинаковые периоды времени.

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 представлены в табл. 4.

Таблица 4. 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 ₄ ⁻ , мг/дм ³	134.28	126.8	131.5	428.3	258.3	320.1
Cl ⁻ , мг/ дм ³	4.7	11.6	14.8	6.2	13.4	16.3
Fe общ., мг/ дм ³	0.68	0.29	0.24	0.19	0.26	0.20
NO ₃ ⁻ , мг/ дм ³	3.07	8.42	12.1	1.90	10.50	14.7

Общее железо. Повышенное содержание ионов железа в подземных водах отмечается в южной и юго-восточной (промышленной) зонах города Казани. Источником загрязнения является ТПО «Свияга» КЭТЗ. Здесь отмечена вертикальная взаимосвязь между разноуровневыми гидростратиграфическими подразделениями в виде гидрохимической аномалии «железное окно», имеющей форму вертикального цилиндра (рис. 5). В 90-х годах предприятие было закрыто, что вызвало самоочищение техногенно-преобразованных подземных вод неогенового и нижнеказанского комплексов. Максимальная концентрация железа (233 мг/дм^3) на водозаборе зафиксирована в конце XX века. В настоящее время концентрация железа снизилась до 20 мг/дм^3 , что свидетельствует о возможности природной реабилитации подземных вод. Согласно расчетам, к 2030 году площадь аномалии «железное окно» существенно сократится.

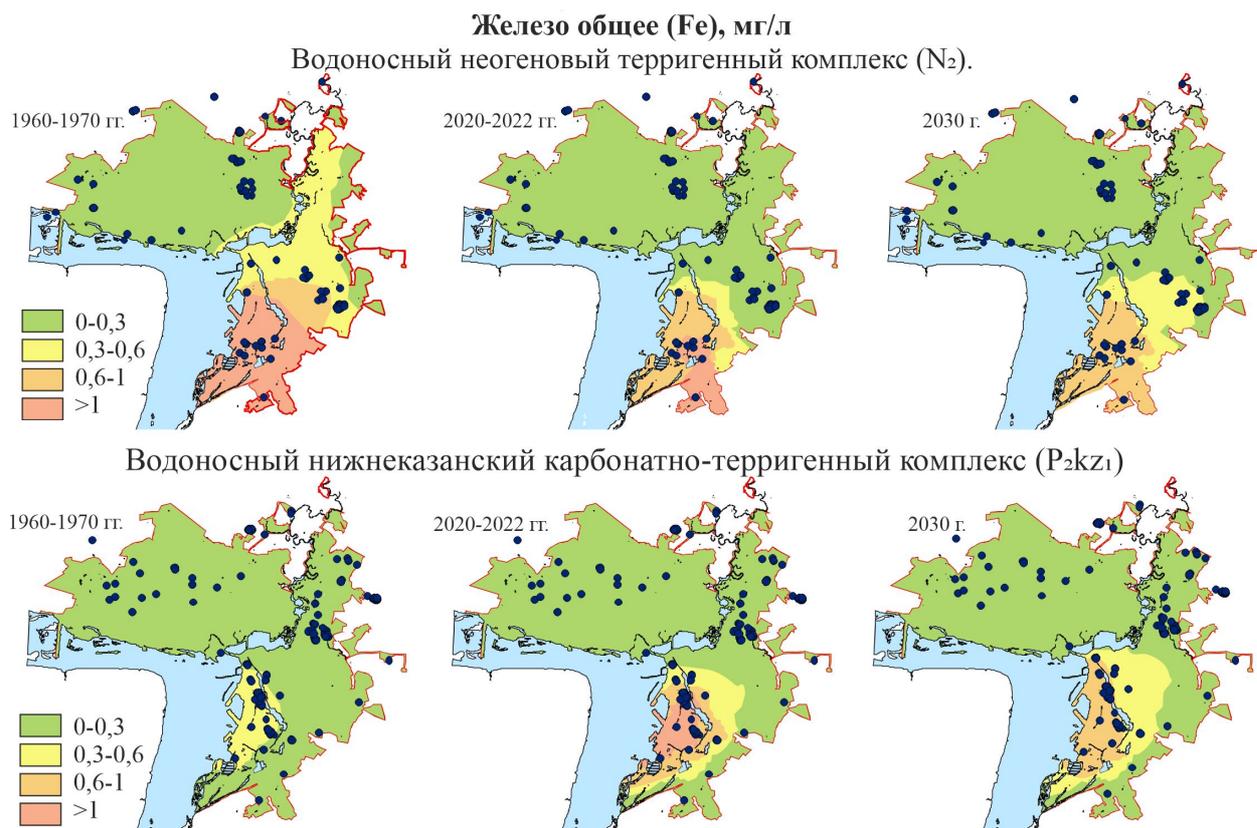


Рис. 5. Карты динамики изменения содержания общего железа в подземных водах неогенового и нижнеказанского комплекса

Хлориды. Другая тенденция выявляется для хлор-иона в водах рассматриваемых гидрогеологических комплексов. Хлориды нехарактерны для вод нижнеказанского комплекса (от первых до 42 мг/дм^3), хотя тенденция их увеличения в последние десятилетия проявилась достаточно отчетливо (рис. 6). 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 хлорит-иона в подземных водах отмечаются в центральной части города возле озера Нижний Кабан и протока Булака. Содержание хлора в рассматриваемых гидрогеологических комплексах прямо зависит от мощности кайнозойских отложений, а также от состава перекрывающих пород. Именно здесь расположены «гидрогеологические окна», в которых содержание Cl в подземных водах уменьшается с увеличением глубины. Проникновение техногенного загрязнения с земной поверхности в воды нижнеказанского 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/дм³).

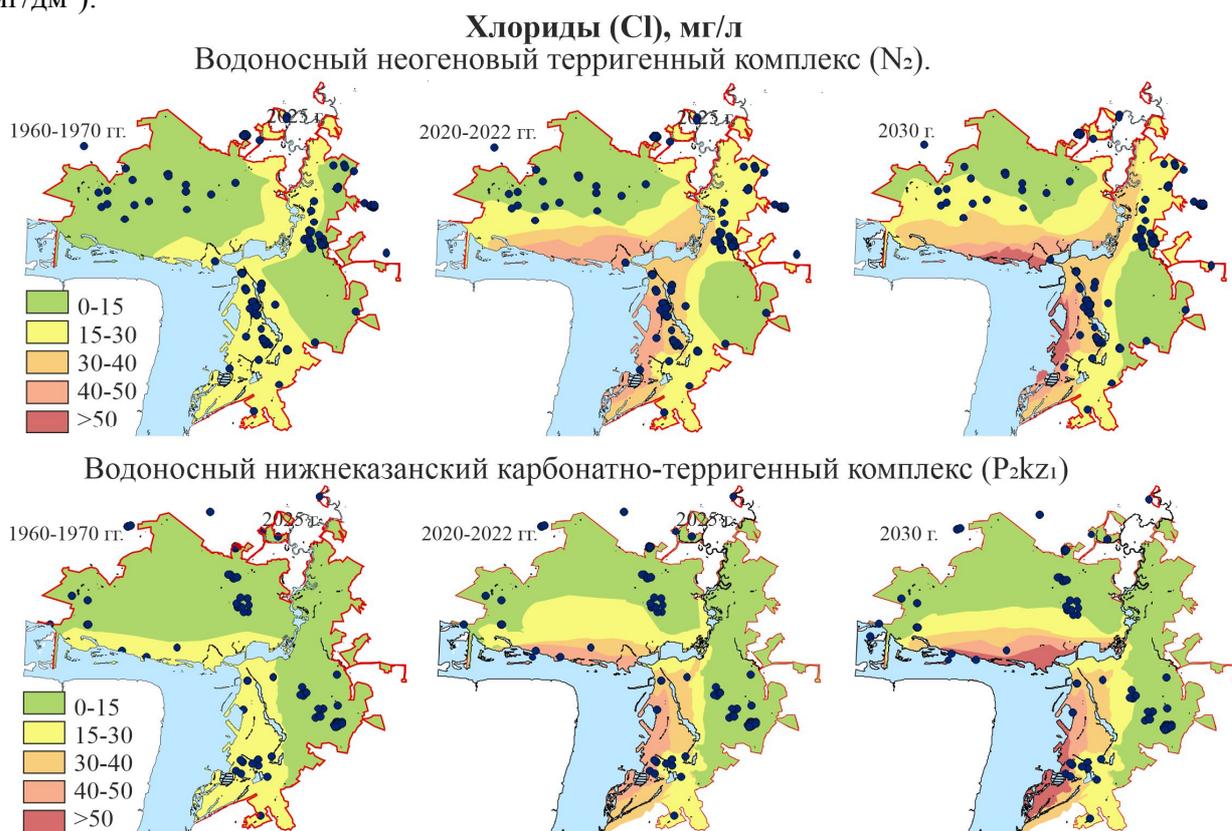


Рис. 6. Карты динамики изменения содержания хлор-иона в подземных водах неогенового и нижнеказанского комплекса

Сульфаты. Для сульфат-иона нижнеказанского комплекса характерны колебания значений от первых десятков до 560 мг/дм³ (при ПДК 500 мг/дм³). Высокие концентрации сульфат-иона (более 500 мг/дм³) зафиксированы в нижнеказанском водоносном горизонте в долине реки Казанка и в районе озера Кабан. Поведение сульфат-иона за полувековой период от 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. 7). 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.

Нитраты. Относительное беспокойство может вызывать увеличение концентраций нитратов – от средних значений 0.43 мг/дм³ в первый период до 9.37 мг/дм³ во второй период (рис. 8). Содержания нитратов превышают ПДК 45 мг/дм³ в более 10% скважин. Предположительно, тенденция увеличения нитратов обусловлена недостаточной очисткой коммунально-бытовых стоков, которые проходят через мощный естественный фильтр пород, перекрывающих неогеновый и нижнеказанский комплексы, и только через десятилетия могут достигать водоносных горизонтов.

Прогнозы распределения природно-техногенных компонентов в водах неогенового и нижнеказанского водоносных комплексов, сделанные с помощью моделирования временных рядов, показали, что в будущем может произойти увеличение всех исследуемых

компонентов (сульфат, хлор, нитрат), за исключением содержания иона железа, которое уменьшится. Таким образом, анализ тенденции изменения качества подземных вод имеет важное значение для принятия геоэкологических решений.

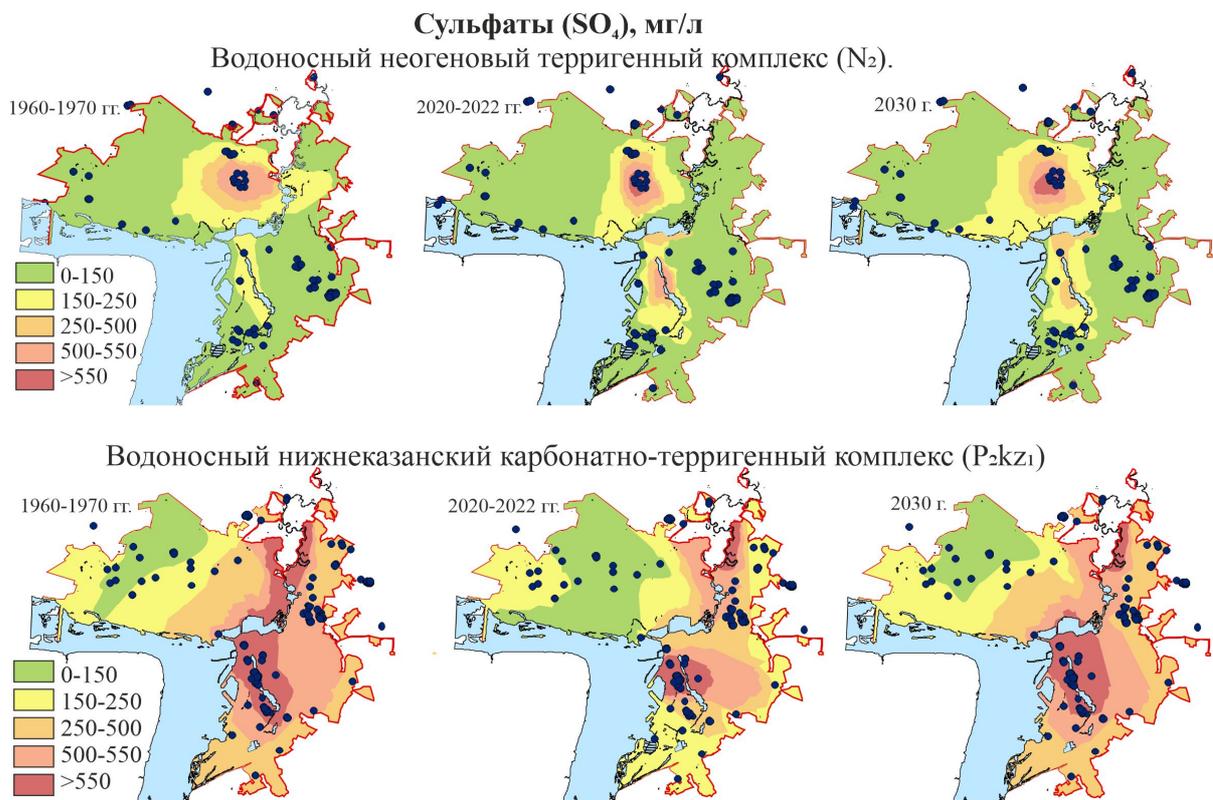


Рис. 7. Карты динамики изменения содержания сульфатов в подземных водах неогенового и нижнеказанского комплекса

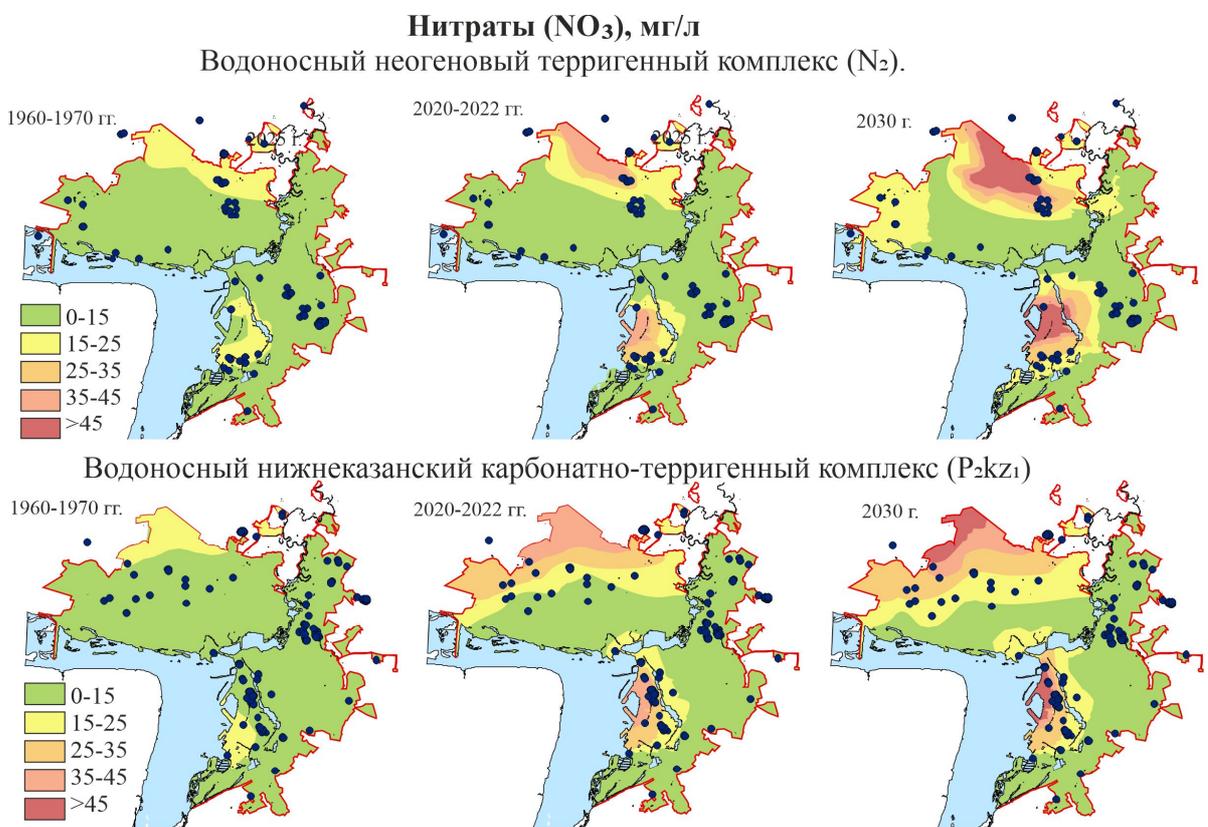


Рис. 8. Карты динамики изменения содержания нитратов в подземных водах неогенового и нижнеказанского комплекса

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 водоносного горизонта от техногенного загрязнения, уклон земной поверхности, площадная закарстованность территории) так и техногенные факторы (суммарный показатель загрязнения почв (СПЗ), удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), гидродинамический режим подземных вод).

Карта природной защищенности от техногенного загрязнения первого от поверхности водоносного горизонта. Для региональной оценки условий природной защищенности подземных вод на протяжении десятков лет является методика, предложенная В. М. Гольдбергом [Гольдберг, 1983]. Методология основана на четырех основных факторах: мощность и литологический состав пород зоны аэрации, фильтрационные свойства, глубина залегания целевого водоносного комплекса (горизонта).

Таблица 5. Типизация природных условий защищенности подземных вод от техногенного загрязнения для г. Казани

Категории условий защищенности	Условия природной защищенности подземных вод	Индекс
IV	Защищенные	1
III	Относительно защищенные	2
II	Слабо защищенные	3
I	Незащищенные	4

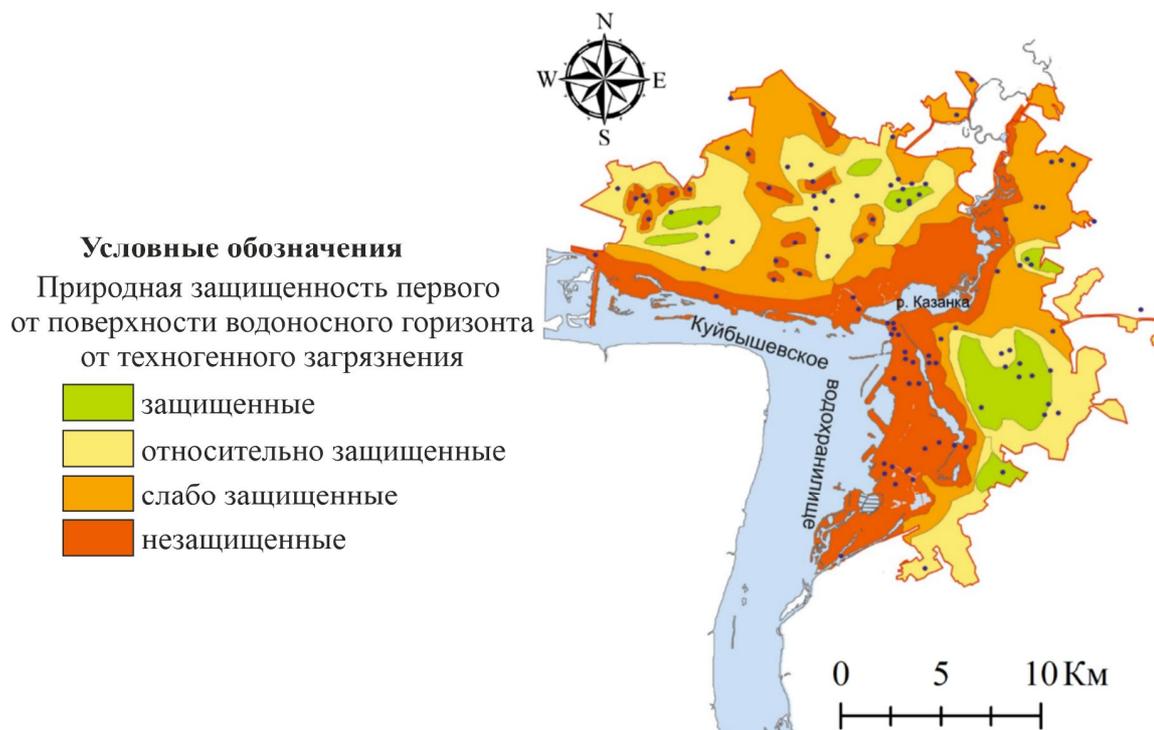


Рис. 9. Карта защищенности подземных вод г. Казани от техногенного загрязнения

Для территории г. Казань автором выделены 4 категории условий защищенности подземных вод от техногенного загрязнения (табл. 5). Неблагоприятными являются условия, соответствующие русловому, пойменному и старичному аллювию рек Волга и Казанка. Условно благоприятная обстановка характерна для нижних частей склонов речных

долин, аллювия первой и второй надпойменных террас Волги. Умеренно благоприятная обстановка отвечает верхней части склонов речных долин, аллювию четвертой и третьей надпойменных террас Волги. Наиболее благоприятными являются условия приводораздельных участков и водоразделов (рис. 9).

Карта уклона земной поверхности. Уклон земной поверхности выступает в роли транспортной составляющей загрязнения и может быть индикатором времени пребывания загрязняющего вещества на поверхности земли.

Дана классификация уклона по четырем различным категориям (табл. 6).

Таблица 6. Уклон рельефа на территории города Казани

Уклон поверхности, %	Индекс
7.1–9	1
5.1–7	2
3.1–5	3
0–3	4

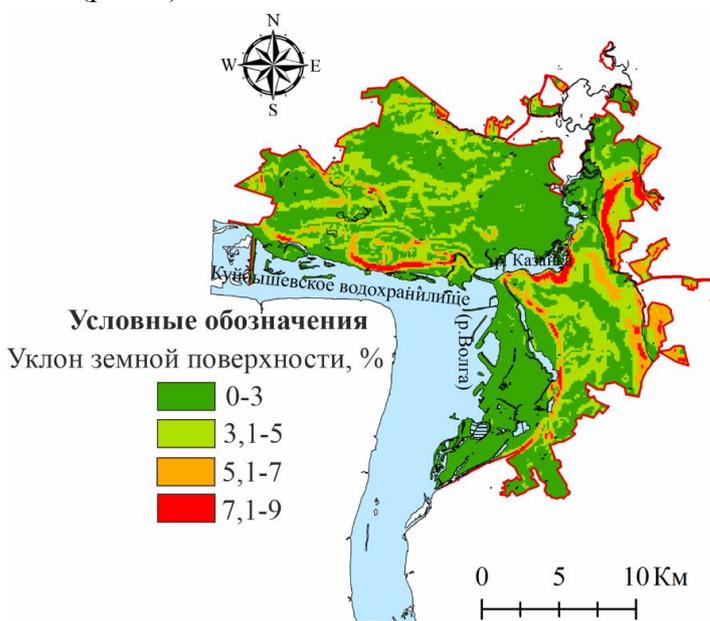


Рис. 10. Карта уклона земной поверхности

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. Результаты показывают, что уклон исследуемой территории находится в диапазоне 0–9%. Около 80% изучаемой территории занято пологими склонами (0–5 %), т. е. высокими рейтинговыми значениями (рис. 10).

Карта карстовых процессов. Широкое развитие карста связано, прежде всего, с обширными площадями распространения растворимых пород и тектонической трещиноватостью. 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 окраин города (рис. 11).

В таблице 7 приведена характеристика площадной закарстованности территории

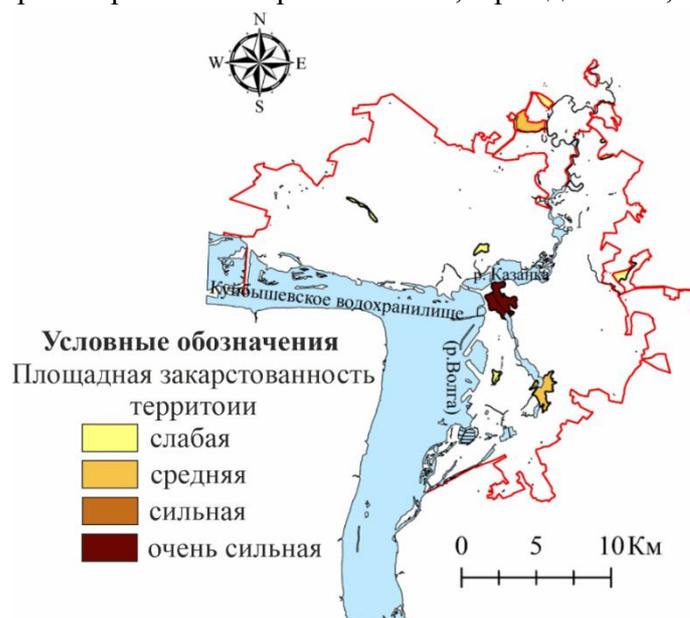


Рис. 11. Карта карстовых процессов на территории города Казани

карстовыми процессами по степени площадного распространения. На карстовые районы приходится 7–12 % площади города Казани.

Таблица 7. 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

Карта удельного комбинаторного индекса загрязнения вод (УКИЗВ). Для расчета УКИЗВ было взято шестнадцать наиболее распространенных компонентов в поверхностных водах исследуемой территории для оценки степени загрязнения вод. 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), биологическому потреблению кислорода (БПК₅). Интерполяция УКИЗВ поверхностных вод на территории города Казани (рис. 12), иллюстрирует качество воды за период опробования (2014–2020 годы). Классификация качества воды, проведенная на основе значений УКИЗВ (табл. 8), позволила классифицировать поверхностные воды города Казани в зависимости от степени их загрязненности.

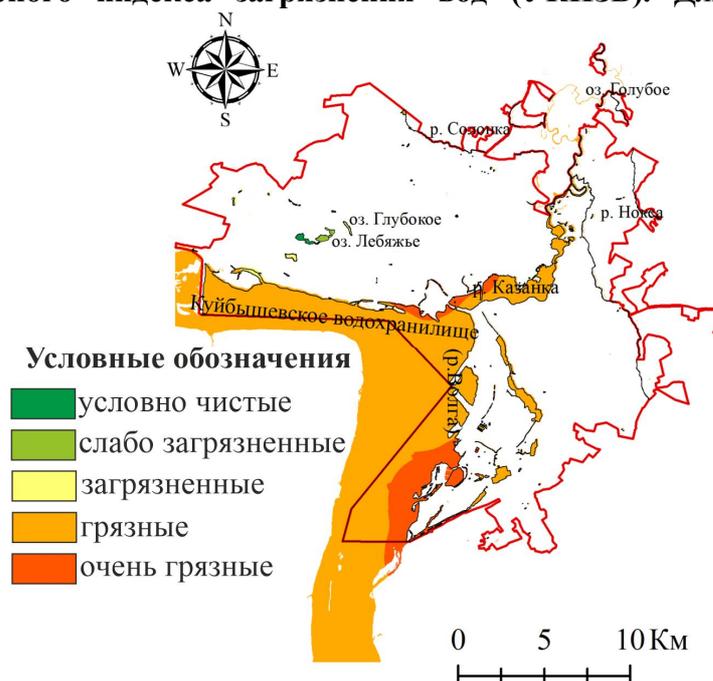


Рис. 12. Карта удельного комбинаторного индекса загрязнения вод на территории города Казани

Таблица 8. 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

Карта суммарного показателя загрязнения почв (СПЗ). Почвенные среды играют существенную роль в комплексной геоэкологической оценке территории. 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.

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

СПЗ почв рассчитывался как сумма превышений концентраций тяжелых металлов в почвах над геохимическим фоном. Классификация загрязненности почв представлена в табл. 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. 13). Высокие значения, полученные в некоторых выборках, связаны в первую очередь с выбросами токсических веществ транспортными средствами и интенсификацией промышленного производства.

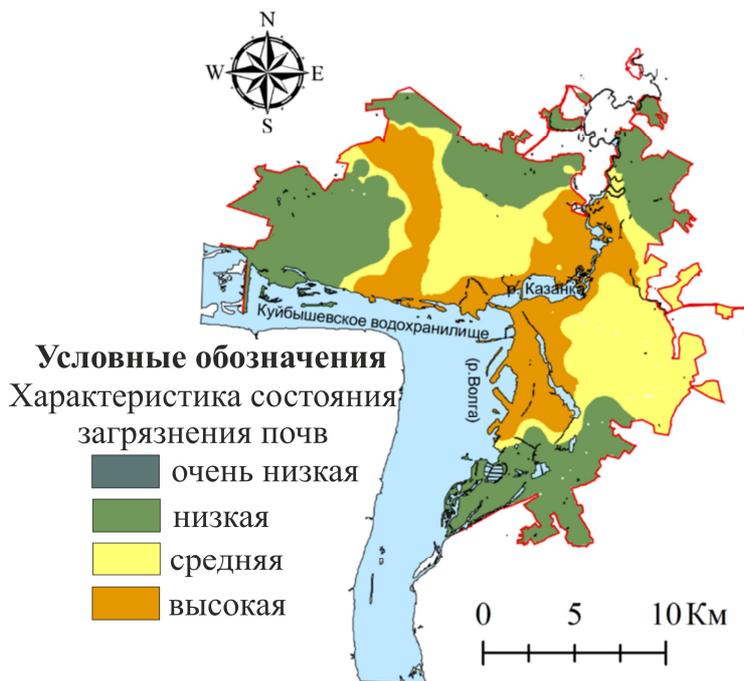


Рис. 13. Карта суммарного показателя загрязнения почв на территории города Казани

Таблица 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

Карта гидродинамического режима подземных вод. По степени антропогенного влияния выделяется два режима: ненарушенный (естественный) и нарушенный (техногенный) (табл. 10). 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. Оценка гидродинамического состояния подземных вод на территории г. Казани выполнялась на основе результатов режимных наблюдений по 60 скважинам, в том числе: 24 скважинам, входящим в состав опорной государственной

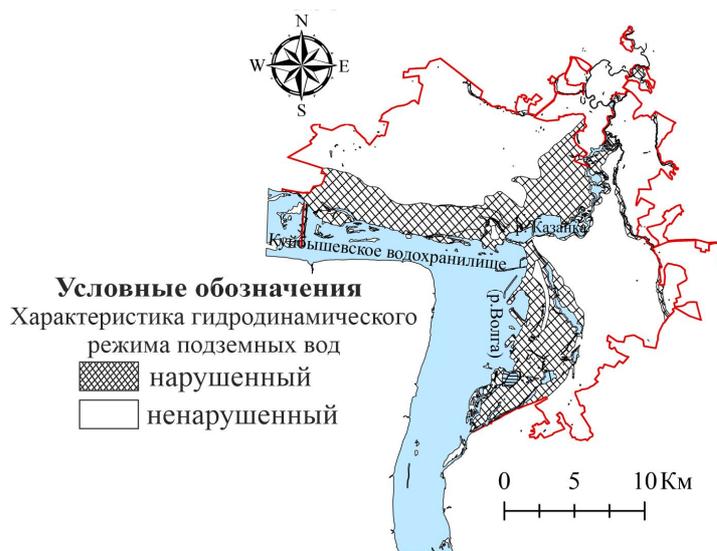


Рис. 14. Карта гидродинамического режима на территории города Казани

наблюдательной сети (ОГНС). Из техногенных факторов, определяющих ее состояние на значительной площади города, является влияние напорного уровня Куйбышевского водохранилища (заполнено в 1955–1957 год), подпор от которого распространяется в прибрежной зоне на расстоянии до 5.0 и более километров от уреза (рис.14). По данным наблюдений, за последние десятилетия уровень грунтовых вод в пределах данной территории варьируется в широком диапазоне – от 0.61 до 8.18 м. Границы распространения глубин залегания уровня имеют сложную конфигурацию (в зависимости от перепадов рельефа).

Таблица 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

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 соотношения между картографических основ природных и техногенных факторов (рис. 15).

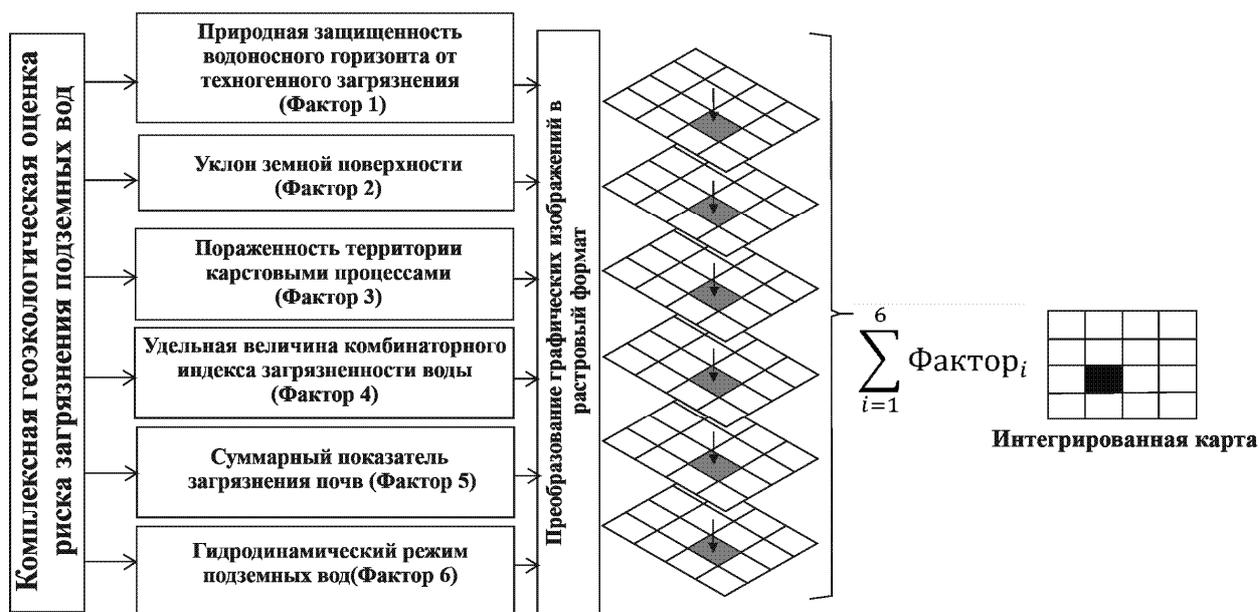


Рис. 15. Принцип расчета интегрального показателя комплексной геоэкологической оценки риска загрязнения подземных вод

Таблица 11. Критерии риска загрязнения подземных вод

Характеристика риска загрязнения подземных вод	Интегральный показатель комплексной оценки риска загрязнения подземных вод
низкий	≤ 7
средний	8–11
высокий	12–15
весьма высокий	≥ 16

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.

Построенная карта (рис. 16) 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 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.

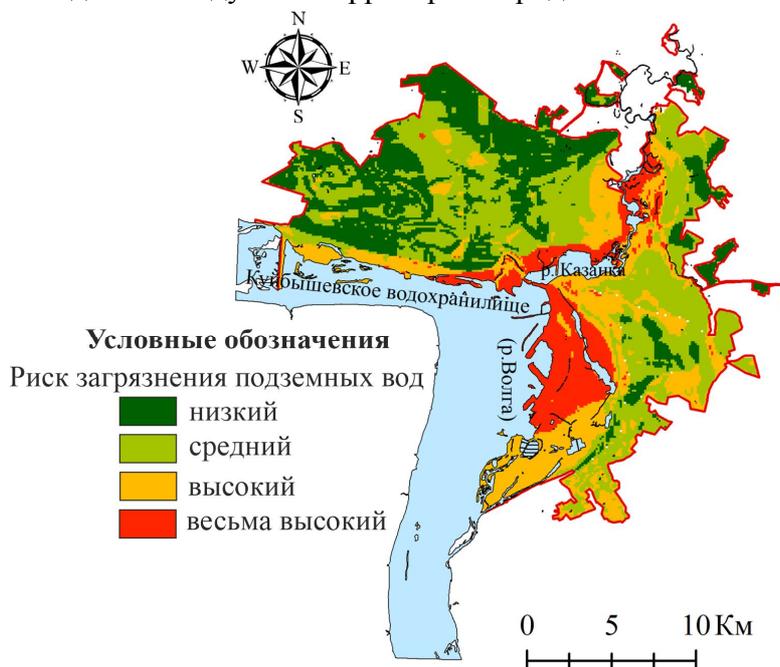


Рис. 16. Комплексная модель оценки риска загрязнения подземных вод на территории города Казани

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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 модели ARIMA.

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 (^2H) в атмосферных, поверхностных и подземных водах города Казани. Эти сведения могут быть использованы для региональных исследований.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК и изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **Shakirzyanov, A.** Assessment of the ecological state of Kazan surface waters / A. Shakirzyanov, **D. Petrova, O. Sofinskaya** // GEORESURSY. – 2021. – Vol. 23, Is. 4. – P. 124–128.

В сборниках научных трудов конференций

5. **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.
6. **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.
7. **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 – СПб: Изд-во ВВМ, 2020. – С. 222–224.
8. **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.
9. **Petrova, D.** Chemical Composition of Groundwater in Kazan / D. Petrova // Proceedings Kazan Golovkinsky Young Scientists' Stratigraphic Meeting 2020 «Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources». Kazan, Russian Federation, 26–30 October 2020. Bologna: Filodiritto Publisher, 2020.– P. 196–200.